



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO
LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH
POLOTOVARŮ Z NEREZAVĚJÍCÍ OCELI**

OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR THE LASER WELDING OF THIN-WALLED BLANKS OF
STAINLESS STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Kačírek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. David Kačírek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace procesních parametrů pro laserové svařování tenkostěnných polotovarů z nerezavějící oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizovat procesní svařovací parametry (výkon, svařovací rychlost) při svařování tenkých trubiček z korozivzdorných ocelí. Nalézt optimální svařovací parametry z hlediska mechanických vlastností svaru i z hlediska ekonomiky výroby.

Cíle diplomové práce:

- Osvojit si základy technologie laserového svařování
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru
- Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoj

Seznam literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KAČÍREK David: Optimalizace procesních parametrů pro laserové svařování tenkostěnných polotovarů z nerezavějící oceli

Pro zvýšení produktivity byla současná technologie svařování trubek pro vlnovce nahrazena laserovým svařováním. Experiment se prováděl na materiálu z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 pro tloušťky plechu 0,25 mm a 0,15 mm. U plechu 0,25 mm bylo dosaženo srovnatelných mechanických vlastností jako u stávajícího postupu výroby při dosažení 10x vyšší rychlosti svařování. Vzorky tloušťky 0,15 mm dosahovaly o 30 % nižší hodnoty prohloubení oproti stávající technologii. Pro zlepšení bylo doporučeno snížit tepelný příkon. Z ekonomického vyhodnocení vyplývá, že cena za 1 metr svaru klesá úměrně s rostoucí rychlostí svařování. S vyšší rychlostí svařování se sníží i tepelný příkon.

Klíčová slova: vlnovec, svařování, mikroplazma, laser, optimalizace

ABSTRACT

KAČÍREK David: Optimization of process parameters for the laser welding of thin-walled blanks of stainless steel

For increase productivity, the current technology of welding pipes bellows was replaced by laser welding. Experiment was carried out on the material of austenitic stainless steel 1.4541 for sheet thickness 0.25 mm and 0.15 mm. On sheet 0.25 mm was achieved comparable mechanical properties as the current manufacturing process upon achieving 10 times higher welding speeds. Samples of 0.15 mm thickness achieved to about 30% lower deepening over existing technology. For improvement was advised to reduce heat input. From an economic assessment shows that the price per 1 m of weld decreases with increasing speed welding. With higher welding speeds reduces the heat input.

Keywords: bellows, welding, microplasma, laser, optimization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KACÍREK, David. *Optimalizace procesních parametrů pro laserové svařování tenkostěnných polotovarů z nerezavějící oceli*. Brno, 2016. 53s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. a panu doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za uskutečnění mechanických zkoušek.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě podporovala během celého studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
ÚVOD	9
1 ROZBOR STÁVAJÍCÍ VÝROBY	10
1.1 Možnosti optimalizace.....	11
2 ROZBOR TECHNOLOGIE.....	13
2.1 Mikroplazmové svařování	13
2.2 Laser	14
2.2.1 Vlastnosti laserového světla	16
2.3 Průmyslové lasery	17
2.3.1 Plynové lasery	18
2.3.2 Pevnolátkové lasery.....	20
2.3.3 Polovodičové lasery	23
2.3.4 Použití laserů	24
2.4 Laserové svařování.....	26
2.4.1 Interakce záření s materiálem.....	26
2.4.2 Parametry svařování	28
2.4.3 Hybridní metody.....	29
2.4.4 Skenerové svařování.....	30
2.5 Svarové vady	30
2.6 Zkoušky svarového spoje	31
2.7 Struktura austenitických ocelí	32
3 EXPERIMENT	34
3.1 Zkouška tahem.....	36
3.1.1 Zkouška tahem pro vzorky tloušťky 0,25.....	36
3.1.2 Zkouška tahem pro vzorky tloušťky 0,15.....	39
3.2 Hloubení podle Erichsena.....	43
3.2.1 Zkouška hloubením pro vzorky tloušťky 0,25	44
3.2.2 Zkouška hloubením pro vzorky tloušťky 0,15	45
3.3 Metalografické šetření	46
3.3.1 Metalografie pro vzorky tloušťky 0,25	47
3.3.2 Metalografie pro vzorky tloušťky 0,15	48
3.4 Struktura materiálu	50
3.5 Skutečný tepelný příkon	51
4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY	52
ZÁVĚRY.....	53
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	
Seznam obrázků	

ÚVOD [3], [17], [26], [43], [47], [49]

Kovové vlnovcové hadice mají v průmyslu mnohostranné možnosti využití od letectví a kosmonautiky po automobilový průmysl a technické vybavení budov. Jsou naprosto těsné a používají se k vedení kapalin, plynů pod tlakem, jako vakuové potrubí nebo k přenosu kroutícího momentu. Vytvarováním rovnoběžných vln na hadici se dosahuje pružnosti. Tvar vln dodává hadicím charakteristické vlastnosti. Díky své tuhosti vyrovnávají pohyby v systémech rozvodů, termické dilatace a vibrace.

Vlnovcové hadice jsou tvářeny z bezešvých nebo podélně svařených trubek. Při výrobě ze svařených trubek tenkých tlouštěk stěn (řádově desetiny milimetru) se svary provádí mikroplazmovým svařováním. Z důvodu zvýšení produktivity jsou testovány metody náhrady svařovacího procesu. Příklady kovových vlnovců jsou uvedeny na obr. 1.



Obr. 1 Příklady kovových vlnovců [3], [47], [26], [17].

1 ROZBOR STÁVAJÍCÍ VÝROBY [43], [34]

Výrobu kovových vlnovců u nás zajišťuje společnost Elasteflex Lysice s.r.o. Spadá do skupiny SKODOCK Gruppe, která je celosvětovým vedoucím výrobcem vlnovců, kompenzátorů a kovových hadic. Jejich výrobky nachází využití v mnoha odvětvích průmyslu. Rozsah vyráběných hadic se pohybuje v rozmezí 15 – 2800 mm jmenovité světlosti.

Kovové vlnovce jsou podle stávajícího postupu vyráběny z pásu plechu. Nekonečný pás plechu je protahován přípravkem, ve kterém je zakroužen a následně svařen pomocí mikroplazmy. Na konci přípravku je již svařená trubka zakracována na určitou délku. V dalším kroku je trubka dělena na přesně rozměrově dané délky. Vlny na trubce mohou být vytvořeny několika způsoby, mechanickým válcovacím postupem, hydraulickým tvářením nebo tvářením elastomerem. V dalších operacích může být na vlnovec umístěno drátěné opletení. V posledním kroku jsou k vlnovcům přidělaný koncovky a to buď pájením, lepením, svařováním nebo silovým a tvarovým spojem. Na obrázku 2 je vlevo vyobrazena svařená trubka s viditelným svarem a na pravém obrázku je trubka s již vytvořenými vlnami.



Obr. 2 Kovový vlnovec před a po vytvoření vln.

Standardní materiály kovových vlnovců jsou například oceli 1.4541, 1.4571, 1.4404, 1.4435 nebo měď a bronz. Z nestandardních materiálů to mohou být inconel 600/625, monel 400, titan.

Experiment se bude provádět na materiálu z austenitické korozivzdorné oceli s označením 1.4541 (značení podle normy ISO: X6CrNiTi18-10) o tloušťce 0,25 mm a 0,15 mm. Aby byla zaručena korozivzdornost i po svařování ocel stabilizována titanem, který zabrání tvorbě karbidů chrómu na hranicích zrn. Karbidy chrómu mohou být příčinou mezikrystalické koroze. Chemické složení oceli 1.4541 je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.4541 [43].

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
Obsah [hm. %]	max 0,08	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0 – 19,0	9,00 – 12,0	5 x C – 0,70

Austenitické oceli se používají ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Po tepelném zpracování jsou měkké a houževnaté, při tváření za studena se rychle zpevňují. Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 jsou uvedeny v tabulce 2. Dle materiálových listů je tato ocel vhodná pro svařování všemi obvyklými postupy. Atesty materiálů jsou přiloženy v příloze 1 a 2.

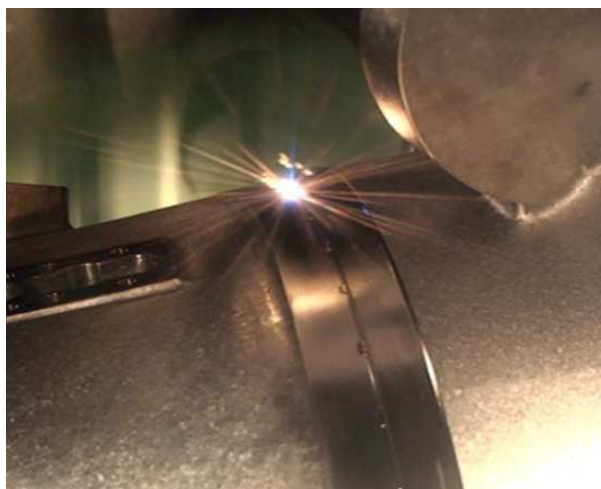
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 [43].

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%] min	Modul pružnosti E [GPa]
	220	520 - 720	40	200

1.1 Možnosti optimalizace [1], [2], [32], [38]

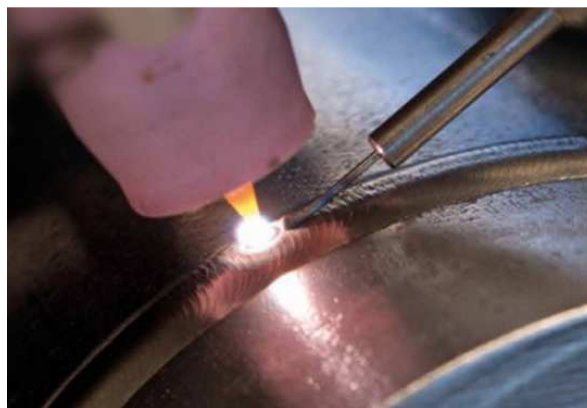
Dále je v práci řešena vhodná optimalizace svařovacího procesu zakroužených trubek výběrem jiné technologie než mikroplazmy za účelem zvýšení produktivity. Každá technologie má své výhody i nevýhody a pro danou výrobu je potřeba zvolit tu nejvhodnější.

- Svařování svazkem elektronů – proces tavného svařování, kdy se kinetické energie rychle letících elektronů mění na tepelnou při dopadu na povrch materiálu. Touto metodou je možné svařovat tloušťky materiálu v rozmezí 0,1 až 50 mm. Dosahuje se vysoké koncentrace energie až 10^8 W/cm^2 . Výsledný svar má dobrý vzhled. Svařovací proces se zhotoveným svarem lze vidět na obr. 3. Natavená a tepelně ovlivněná oblast svaru je úzká a vzniká minimální deformace svařované součásti. Svařování probíhá ve vakuu, a tím je zajištěna dokonalá ochrana svaru před vlivem vzdušné atmosféry. Svařovací rychlosti se ovšem řádově dosahuje podobných jako při svařování plazmou, navíc jsou zde vysoké investiční náklady kvůli nutnému svařování ve vakuu. S vakuem jsou spojeny i časové prodlevy způsobené jeho čerpáním. Svařováním touto metodou se nedosáhne markantního zvýšení produktivity, ale naopak se zvýší ekonomická náročnost.



Obr. 3 Průběh svařování svazkem elektronů [38].

- Svařování metodou WIG – metoda využívána hojně ke svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí, kdy oblouk hoří mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem (obr. 4). Ochranu elektrody a svarové lázně zajišťuje inertní plyn o vysoké čistotě minimálně 99,995 %, používá se argon, helium nebo jejich směsi. Pro malé tloušťky plechu lze svařovat bez přídavného materiálu. Svařování tenkých materiálu se provádí impulsním proudem, při kterém se intenzita proudu pravidelně mění s časem mezi základním proudem a impulsním proudem. Součet času



Obr. 4 Svařování trubky metodou WIG s přídavným materiálem [1].

pulsního a času základního proudu udává celkový čas cyklu určující frekvenci pulsního svařování. Dlouhé pulzy řádově od 1 do 10 sec jsou pro tloušťky materiálu 4 až 6 mm a velmi krátké pulzy s frekvencí 1 až 20 MHz pro tloušťky 0,2 až 0,8 mm. Rychlost svařování musí být sladěna s frekvencí impulsů a s rostoucí frekvencí roste i svařovací rychlost. V porovnání s jinými metodami má však nižší produktivitu a ve srovnání s plazmovým svařováním dosahuje nižších rychlostí a je nevhodný pro tenké materiály.

- Svařování laserem (obr. 5) – ve srovnání s běžnými metodami svařování jako například MAG nebo WIG umožňuje svařování laserovým paprskem cílit paprsek na velmi malou plochu o průměru až 10 μm . Hustota výkonu v dopadové ploše může dosahovat hodnot až 10^{13} W/cm^2 , pro svařování se používá rozsah výkonu 10^4 až 10^8 W/cm^2 . Při hustotách do 10^6 W/cm^2 dochází k přenosu tepla převážně vedením, je vhodné pro svařování tenkých plechů. Díky malému vnesenému teplu je vysoká rychlost ochlazování. Výborných výsledků se dosahuje při svařování vysokolegovaných ocelí. Výhodou je snadná automatizace procesu, tichý provoz, adaptabilnost laseru s rychlou změnou technologie. Oproti svařování plazmou by měl laser dosahovat několikanásobně vyšších svařovacích rychlostí, proto je vhodný pro zvýšení produktivity výroby.



Obr. 5 Příklad svařování laserem [32].

Laser se jeví jako vhodná volba pro změnu technologie i přes své vyšší pořizovací náklady oproti jiným technologiím. Otázkou je jestli při zvýšené rychlosti svařování je možno dosáhnout lepší nebo alespoň stejné kvality svaru jako při stávající technologii svařování mikroplazmou. Podrobný rozbor principů, vlastností a typů laserů je rozebrán v následující kapitole.

2 ROZBOR TECHNOLOGIE [2], [4]

Vzhledem k řešenému problému se teorie zabývá i stávajícím postupem svařování mikroplazmou pro srovnání se svařováním pomocí laseru. Hlavní důraz je ovšem kladen na svařování laserem jakožto nastupující technologie pro výrobu dané součásti.

Obě metody spadají do kategorie tavného svařování a obě dosahují vysoké koncentrace tepelné energie na jednotku plochy. Každá metoda ovšem dosahuje při svařování jiných parametrů, které jsou rozhodující při volbě metody pro svařování zvolených součástí.

2.1 Mikroplazmové svařování [2], [40], [41]

Mikroplazma využívá vysoké stability hoření plazmového oblouku i při nízkých proudech. Proud se pohybuje v rozmezí 0,05 až 20 A, tím je umožněno svařovat kovové fólie o tloušťce 0,01 mm. Svařování mikroplazmou funguje na stejném principu jako svařování plazmou, liší se pouze intenzitou proudu.

Svařování plazmou je založeno na principu ionizace plynů při průchodu elektrickým obloukem, při které dochází k uvolnění nebo vyražení elektronů z vnějších valenčních orbit atomů. Uvolněné elektrony v plazmě vedou elektrický náboj. Plazma je ionizována částečně. K úplné ionizaci dochází při teplotách kolem 100 000 K, kterých ve svařování není dosahováno. Plyn, který není ionizován a je chladnější, stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tím, že zabraňuje dotyku mezi plazmou a stěnou trysky. U dvouatomových plynů jako je například dusík, vodík a kyslík musí před ionizací proběhnout disociace plynu. Disociace plynu je rozložení molekul plynu na atomy. Příklad disociace a ionizace dusíku je uveden ve vztahu (1.1) a (1.2).



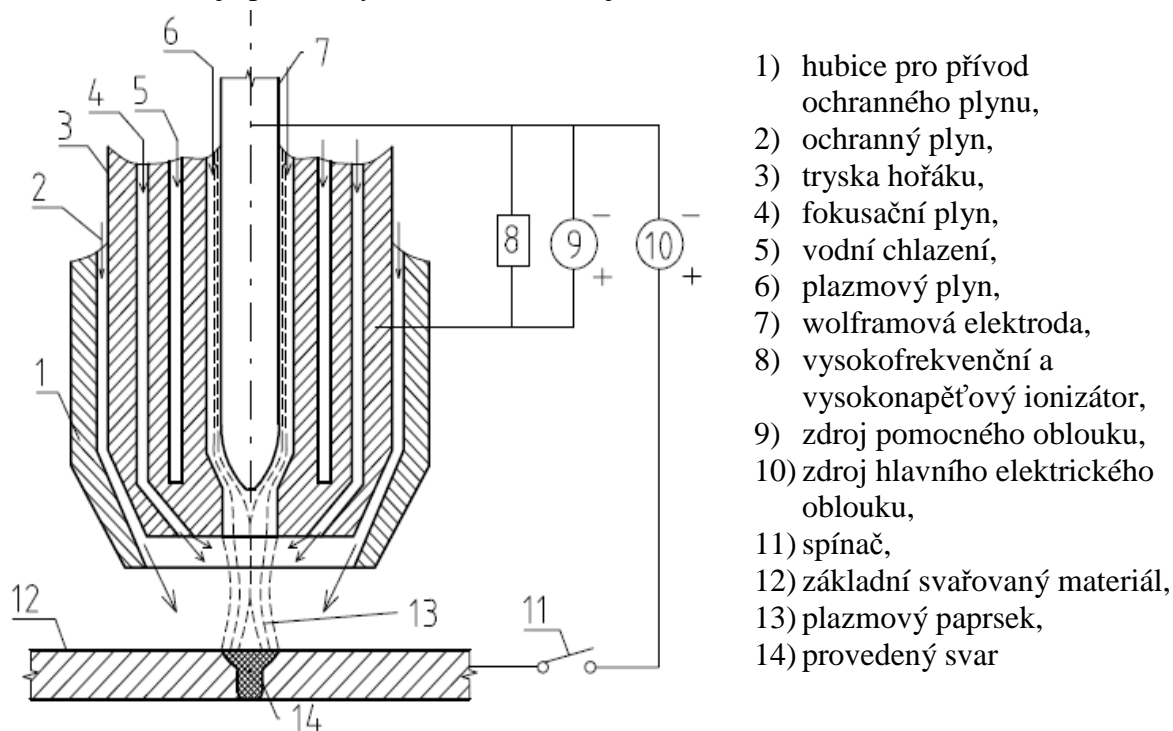
kde: E_{dis} - energie potřebná na disociaci,
 E_{ion} - ionizační energie.

Při plazmovém svařování se mohou používat tři druhy plynů: ochranný plyn pro ochranu svarové lázně proti vzdušné atmosféře, fokusační pro zúžení plazmového paprsku a plazmový. Jako plazmový plyn jsou nejčastěji používány plyny a směsi plynů Ar, Ar + H₂, Ar + He. Plazmové plyny se liší především v průměrných dosahovaných teplotách plazmy. Například vodíková plazma dosahuje teplot 10 000 K, argonová plazma 16 000 K a plazma stabilizovaná vodou až 35 000 K.

Elektrický oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem. Jedná se o podobný způsob jako svařování metodou WIG, jen je navíc do elektrického oblouku vháněn plazmový plyn. Schéma plazmového hořáku je znázorněno na obr. 1. U plazmového hořáku je zúžená trubice, která napomáhá k zúžení plazmového paprsku. Výstupní rychlost plazmy při svařování je v rozmezí 200 – 500 m.s⁻¹.

Elektrické zapojení může být dvojího způsobu. Nezávislé zapojení, kdy připojené póly zdroje jsou na elektrodu a kovovou trysku, se používá pro žárové nástřiky nebo povrchové kalení. Zapojení závislé, u kterého je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól ke svařovanému materiálu. Závislé zapojení se používá zejména pro svařování, navařování a řezání. Pro zapálení pomocného oblouku se používá vysokofrekvenční ionizátor připojený k trysce hořáku.

Na obrázku č. 6 je plazmový hořák, na kterém je možno vidět:



Obr. 6 Plazmový hořák [2].

Mezi výhody plazmového svařování patří možnost mechanizace svařovacího procesu, vysoká čistota svaru bez pórů a bublin, velmi dobrý průvar i tvar svaru, dobré mechanické vlastnosti svarového spoje, podstatně vyšší svařovací rychlosti ve srovnání s metodou TIG a spolehlivé provaření kořene.

Při mikrop plazmovém svařování tenkých folií je problém dodržení šířky svarové mezery mezi spojovanými materiály, která by se měla pohybovat v rozmezí 10 až 20 % tloušťky folie. Je nutné používat upínací přípravky pro zajištění stálé polohy při svařování a pro odvod tepla. Korozivzdorné austenitické oceli se svařují bez úpravy úkosu do tloušťky 10 až 12 mm.

2.2 Laser [2], [4], [5], [10], [20], [27]

Slovo LASER je zkratka z anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, který v překladu znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“ a vysvětluje princip fungování laseru. V roce 1917 předpověděl možnost existence spontánní i stimulované emise záření Albert Einstein. První laser byl sestaven už v roce 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem. Laser vytváří intenzivní kolimovaný paprsek koherentního monochromatického světla.

Laserový paprsek je vlnění optického druhu, které patří do skupiny elektromagnetického záření. Běžné světelné záření obsahuje vlny různých vlnových délek a frekvencí vycházejícími různými směry. U laserů se podařilo vytvořit prostředí, kde se potlačí spontánní emise záření a umožní se vynucená stimulovaná emise. Podstatou laseru, že elektromagnetická vlna o určité frekvenci vynucuje přechod elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší, a tím se posilňuje původní vlna (vzdálenost dvou energetických hladin určuje násobek Planckovy konstanty).

Z kvantové fyziky vyplývá, že molekula nebo atom může přijmout (vyzářit) energii jen v určitých dávkách – kvantech. Energie je dána rozdílem mezi energetickými hladinami, který může elektron zaujmout, a vyjadřuje ji Bohrovův vztah:

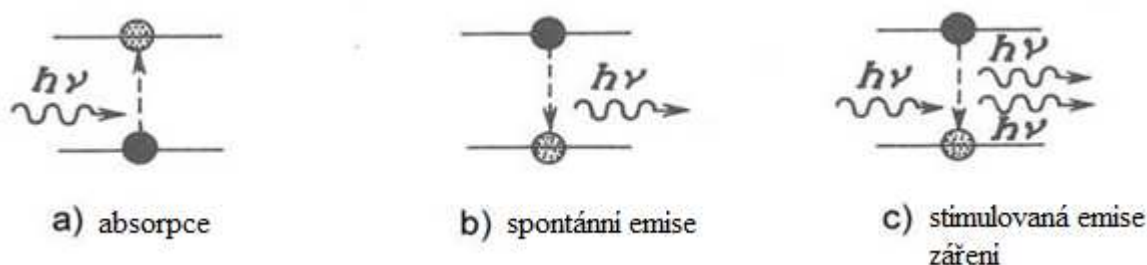
$$E_r = h \cdot \nu_f \quad (2.3)$$

kde: E_r - energetický rozdíl mezi hladinami [J],

h - Planckova konstanta ($6,63 \cdot 10^{-34}$) [J·s],

ν_f - frekvence vyzařeného fotonu [s^{-1}].

Stimulovaná emise je jev, který může nastat při interakci fotonu s atomem nebo molekulou a nastává v aktivním prostředí laseru. Aktivní prostředí laseru je látka schopná zesilovat procházející záření stimulovanou emisí. Mohou nastat tři možné interakce fotonu s atomem (obr. 7). Když letící fotony (elektromagnetická vlna) narazí na atom, který se nachází v klidovém stavu, a energie fotonů je rovna rozdílu energetických hladin $E_2 - E_1$ ($E_1 > E_2$), je tato energie absorbována a atom přechází na vyšší energetickou hladinu. Atom se nazývá „vybuzený“. Atom nesetrvává ve vybuzeném stavu dlouho a přechází z vyšší energetické hladiny na nižší. Při přechodu musí snížit svoji energii. Energie je vyzařena v podobě elektromagnetického záření a tento proces se nazývá spontánní emise. V případě, kdy se atom nachází na vyšší energetické hladině a současně na něj dopadá elektromagnetická vlna se stejnou frekvencí jako spontánně emitovaná vlna, je atom donucen přejít na nižší hladinu. Přechodem na nižší hladinu vyzaří energii. Dopadající a emitované vlnění mají stejný směr a fázi, skládají se a dochází k zesílení původního vlnění, které se nazývá stimulovaná emise záření.



Obr. 7 Schéma interakce fotonu s atomem [20].

Podmínkou pro vznik stimulované emise záření je přítomnost inverzní populace, počet elektronů na vyšší energetické hladině musí být vyšší než počet elektronů na nižší energetické hladině. K udržení tohoto stavu musí být do systému neustále dodávána energie (elektrický výboj, záblesky světla, vysokofrekvenční buzení atd.).

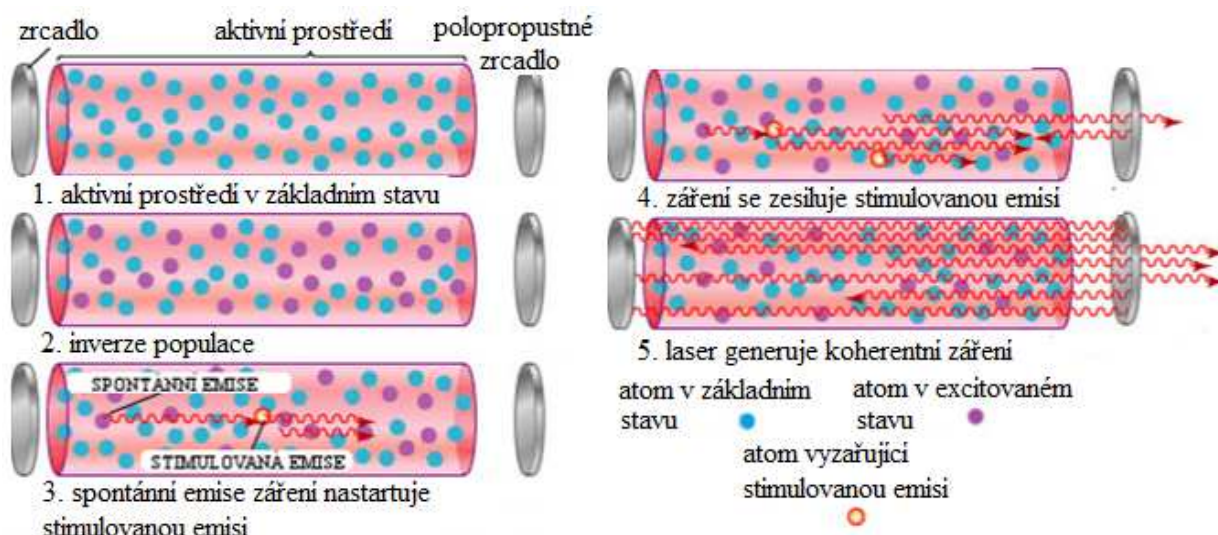


Obr. 8 Schéma optického rezonátoru [20].

Aktivní látka je navíc umístěna v prostoru mezi zrcadly, z kterých je jedno částečně propustné. Prostor mezi zrcadly se nazývá rezonátor (obr. 8). Správná funkce rezonátoru je zajištěna v případě, že v něm vzniká stojaté vlnění. Důležitá je vzdálenost zrcadel (délka rezonátoru), která závisí od vznikajícího záření podle vztahu (2.4).

$$L = n \cdot \lambda \quad (2.4)$$

kde: L - vzdálenost zrcadel [mm],
 n - přirozené číslo [-],
 λ - vlnová délka záření [mm].



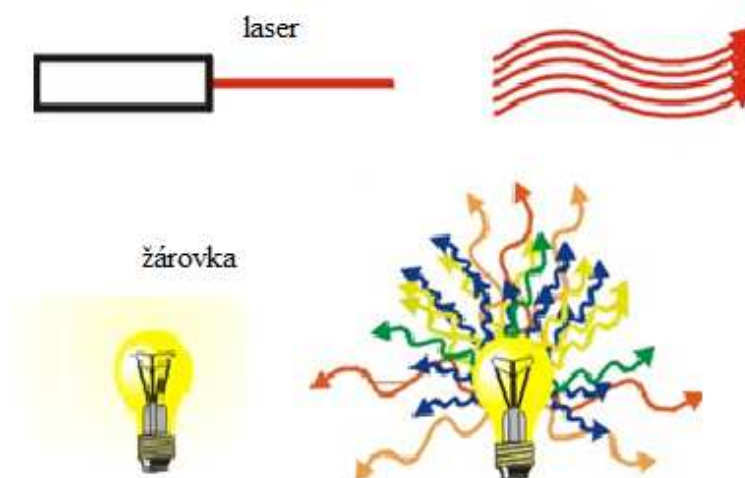
Obr. 9 Princip vzniku laserového záření [27].

Fotony jsou odraženy nastavenými zrcadly, vrací se zpět a umožňují další zesílení světla zesílením stimulované emise záření, jak je zobrazeno na obrázku 9. Část pronikne částečně propustným zrcadlem a tím vzniká koherentní laserový paprsek.

2.2.1 Vlastnosti laserového světla [4], [5], [6], [15], [20]

Paprsek je koherentní, to znamená, že všechny vlny mají identickou vlnovou délku i fázi v prostoru i v čase. Dále je paprsek monochromatický, z toho vyplývá, že všechny vlny mají stejnou vlnovou délku a tím i energii. Navíc jsou všechny paprsky vzájemně paralelní (kolimované).

Vysoká koherence a nízká rozbíhavost umožňují fokusaci paprsku na malý průměr, kterým se dosáhne vysoké hustoty výkonu záření. Tyto vlastnosti odlišují laser od ostatních tepelných zdrojů (obr. 10).

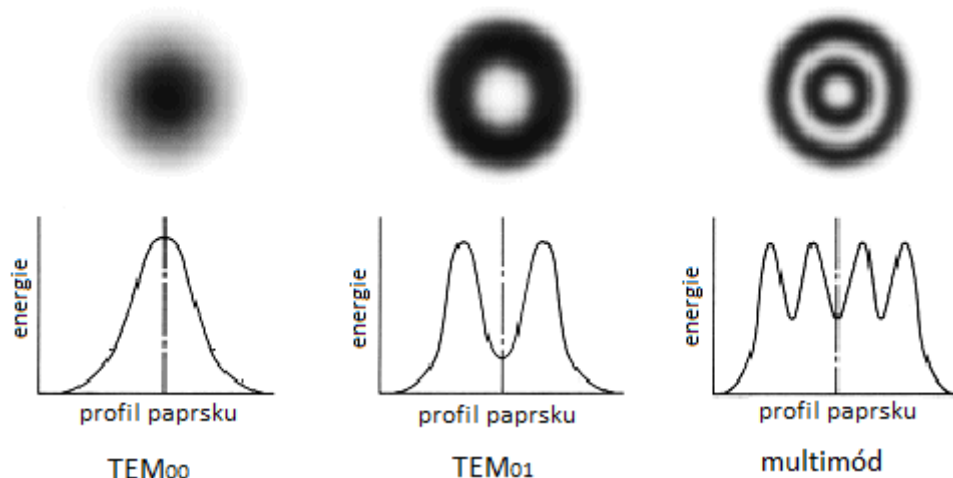


Obr. 10 Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru [15].

Prostorové rozložení elektromagnetického pole je charakterizováno tzv. podélnými a příčnými módy.

Podélný mód charakterizuje typy vln vytvořené optickou dutinou. Určuje převládající vlnou délku, na které laser pracuje. Podélný mód určuje vzdálenost mezi zrcadly, kdy vzdálenost musí být násobkem půlvlnových délek požadované vlny. I přes monochromaticnost laserového paprsku dochází k určitému rozptylu vlnových délek nazývaných vlnové pásmo.

Příčný mód charakterizuje rozložení intenzity v příčném řezu paprsku. Může být definovaný v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}) nebo cylindrickými (TEM_{pl}). Indexy „m“, „n“ reprezentují počet minim ve vertikálním a horizontálním směru (indexy p, l reprezentují počet minim v radiálním a úhlovém směru). Gaussovo rozložení (TEM_{00}) je základním profilem intenzity a je symetrické, ve středu dosahuje maxima a směrem k okrajům se zmenšuje. Některé rozložení se mohou skládat z více bodů. Většina využívaných laserů pracuje s módem s Gaussovým rozložením. Ukázka módů jsou zobrazeny na obrázku 11.



Obr. 11 Ukázka módů [6].

Lasery mohou být rozděleny podle různých hledisek:

- podle charakteru aktivního prostředí: pevnolátkové, kapalinové, plynové,
- podle druhu energie použité na buzení aktivního materiálu: optické, elektrické, chemické,
- termodynamické, s jadrovou hlavou,
- podle režimu práce: kontinuální režim, pulzní režim,
- podle vyzařované vlnové délky: infračervené lasery, ultrafialové, rentgenové, lasery v oblasti viditelného světla.

2.3 Průmyslové lasery [18], [20], [28]

U průmyslových laserů je laserový paprsek opouštějící rezonátor upravován pomocí systému čoček a clon, které zvýší kvalitu a upraví průměr výstupního paprsku. Paprsek je dále veden soustavou zrcadel a čoček do pracovní hlavy laseru. Místo zrcadel a čoček může být případně použito optické vlákno.

Dále je v práci rozebráno rozdělení podle charakteru aktivního prostředí. Kapalinové lasery se používají hlavně ve spektroskopii nikoliv ve svařování, proto v této práci nebudou více popisovány.

2.3.1 Plynové lasery [2], [4], [5], [20], [30]

U plynových laserů jsou aktivní látkou plyny nebo směs plynů a par. V kontinuálním režimu dosahují výkonů od mW až po desítky kW. V pulzním režimu se jedná maximálně o výkon ve stovkách W. Vlnová délka se pohybuje v široké oblasti spektra od ultrafialového záření přes viditelnou až po milimetrovou oblast. Aktivní prostředí je možno dodávat plynulým přívodem dle potřeby.

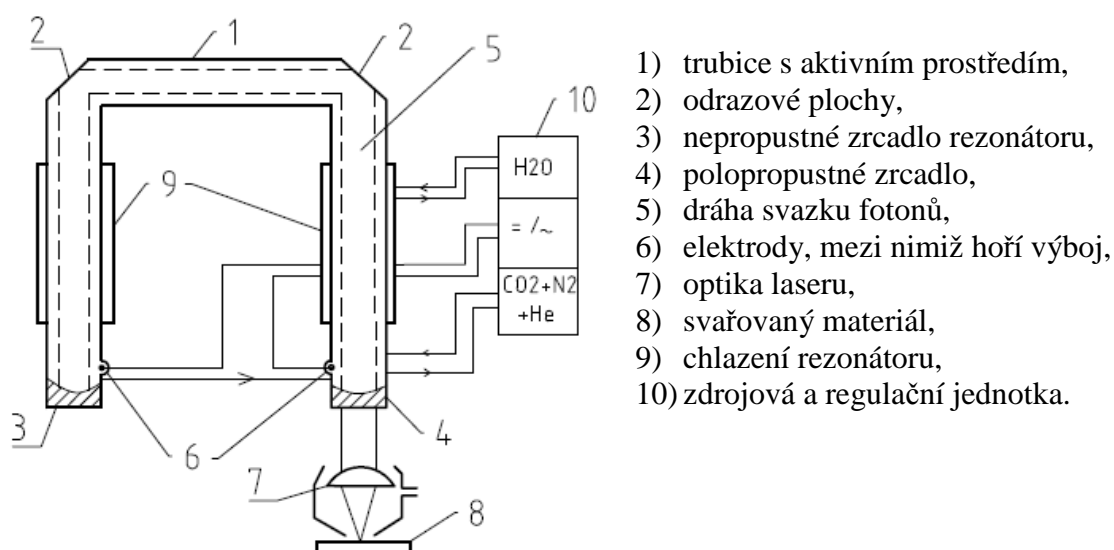
Plynové lasery lze rozdělit do skupin na atomární, iontové a molekulární.

Nejběžnější atomární laser je helium-neonový, který generuje červené světlo a slouží především k zaměřování polohy a podobně. Z iontových laserů je známý argonový laser, vydává modrozelené světlo a používá se převážně ve spektroskopii. Mezi molekulární lasery patří CO₂ laser, který se používá ve strojírenství pro svařování a řezání.

Aktivní prostředí CO₂ laseru je tvořeno směsí plynů He + N₂ + CO₂ uzavřených ve skleněné trubici. Nejběžnější poměr plynů je 82:13,5:4,5. Helium zabezpečuje disipaci světla. V dusíku výboj vytváří energii potřebnou k nabuzení. Proces zesílení začíná excitací molekul dusíku na vibrační hladinu E₄. Rezonanční přenos energie a excitace CO₂ na hladinu E₃ je způsobena srážkami s molekulami dusíku. Při přechodu molekuly oxidu uhličitého z hladiny E₃ na hladinu E₂ je vyzářen foton. Helium odebírá oxidu uhličitému excitační energii, což zajistí návrat molekuly na základní hladinu E₀. Helium má vysokou tepelnou vodivost a ochlazuje aktivní prostředí laseru. Ve srovnání s jinými lasery dosahuje dobré účinnosti, která se pohybuje kolem 10 %, ale může dosahovat až 20 %. Provozní náklady snižuje i recyklování plynů přes výboje.

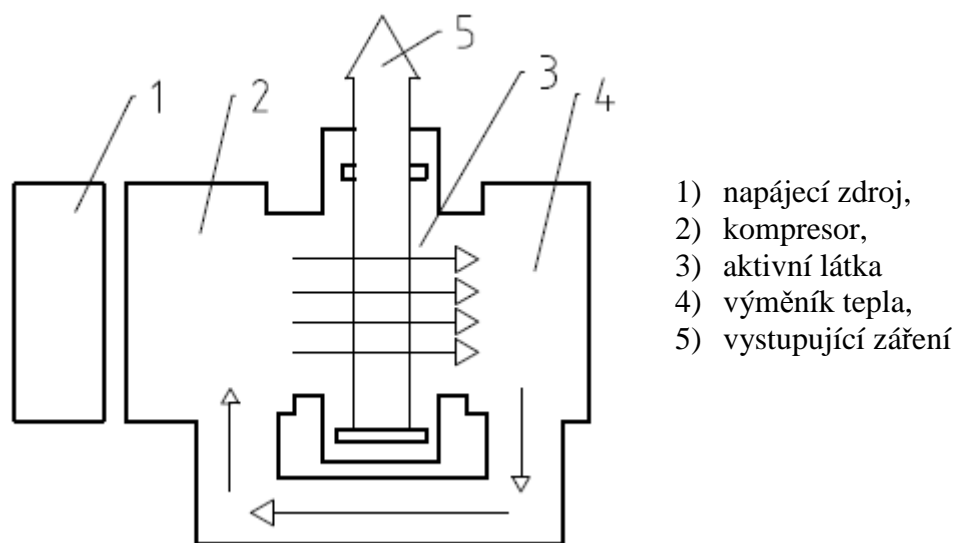
U běžných CO₂ laserů se výkon pohybuje v rozmezí 0,5 až 20 kW, výkonnější mohou dosahovat hodnot až 200 kW. Mohou pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Produkují paprsek o vlnové délce 10,6 μm. Elektromagnetické vlny této vlnové délky mají nižší energii než viditelné světlo, ale větší než mikrovlny. Nevýhodou této vlnové délky je její velká reflexe a větší rozměr stopy fokusovaného paprsku.

Konstrukce CO₂ laseru může umožňovat v aktivní zóně směr proudění plynu buď podélně nebo příčně. Podélné proudění je nejčastěji čerpané doutnavým výbojem. Příčné proudění plynu je buzeno vysokofrekvenčním výbojem a dosahuje vyššího výkonu než podélné proudění. Schéma plynového laseru s podélným prouděním s popisem jednotlivých prvků je na obrázku 12.



Obr. 12 Schéma plynového laseru s podélným prouděním [2].

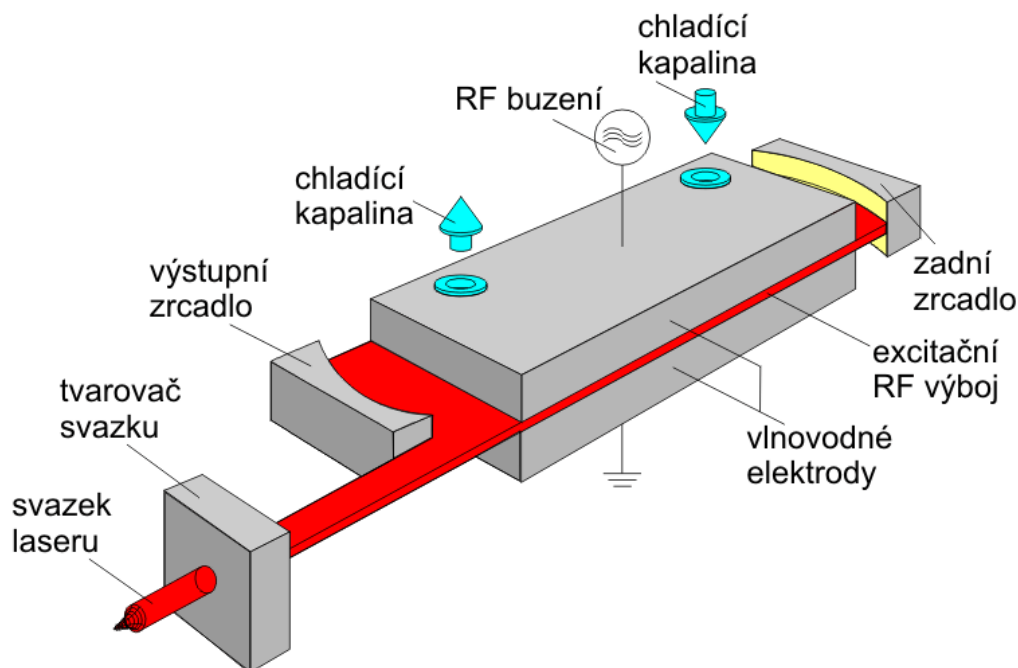
Schéma plynového laseru s popisky jeho hlavních částí je na obrázku 13.



Obr. 13 Schéma plynového laseru s příčným prouděním [4].

Záření CO_2 laseru nelze vést optickými kabely a je nutné používat soustavy zrcadel. Zrcadla musí být kalibrována a jsou kladeny nároky na jejich čistotu, z těchto důvodů je nutná údržba. V průmyslu se nejvíce používají lasery buzené radiofrekvenčně nebo elektrickým výbojem.

Klasické lasery jsou ochlazovány průchodem plynů přes chladič, zatímco u novějších typů CO_2 laseru je chlazení zprostředkováno difúzí tepla do deskových měděných elektrod. Desky elektrod jsou ochlazovány protékající vodou napájenou chladicím okruhem. Vlivem dobrého chlazení není nutné proudění plynu a klesá jeho spotřeba. Deskové CO_2 lasery obsahují zásobník plynů a nepotřebují žádný vnější zdroj. Obsah zásobníku vydrží na rok nepřetržitého provozu. Schéma difúzí chlazeného deskového CO_2 laseru je zobrazeno na obr. 14.



Obr. 14 Schéma deskového CO_2 laseru [30].

Mezi další výhody difuzí chlazených laserů patří:

- vysoká kompaktnost zdroje,
- zdroj s minimem pohyblivých částí,
- vysoká tepelná stabilita,
- nízké provozní náklady,
- malé rozměry.

Nevýhodou CO₂ laseru ve svařování je v porovnání s pevnolátkovými lasery nízká absorpce konstrukčních materiálů v oblasti vlnové délky CO₂ laserů.

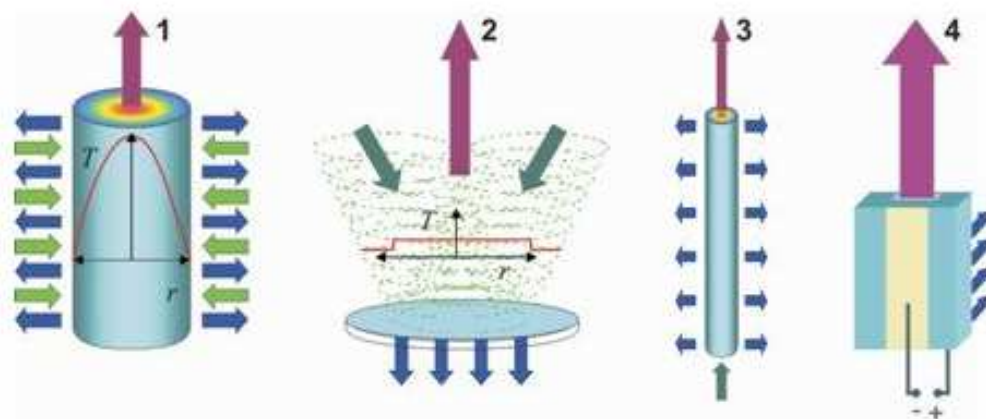
2.3.2 Pevnolátkové lasery [12], [13], [18], [20], [24], [28], [30], [33]

Aktivní látka u pevnolátkových laserů je tvořena pevnými krystalickými nebo amorfními látkami, do kterých se přidávají přísady aktivačních prvků. Aktivní látka musí být opticky homogenní bez nežádoucích přísad a defektů, aby nedocházelo k absorpci a rozptylu světla. Nejčastěji používané aktivátory jsou některé skupiny kovů (Cr, Ni, Co) a lantanoidy (Nd, Sm, Gd, Yb,...). Aktivní látka musí mít fotochemickou odolnost a musí umožňovat mechanické opracování a leštění. Při změně stavu přísadových atomů je absorbována a vyzařována energie. Buzení je optické prováděné výbojkami nebo laserovými diodami.

Výhodou pevnolátkových laserů, na rozdíl od plyných laserů, je možnost vedení výstupního paprsku optickými kabely. Vedení paprsku optickými kabely usnadňuje automatizaci a robotizaci.

Pevnolátkové lasery se používají hlavně ke svařování. Umožňují svařování dílů karoserií z různých materiálů o různé tloušťce (Tailored Blanks).

V současnosti je v průmyslu používáno pět hlavních typů laserů, a to: Nd:YAG, diskové, vláknové, diodové (polovodičové) a více zmíněné CO₂ lasery. Pevnolátkové jsou vyobrazeny na obr. 15.

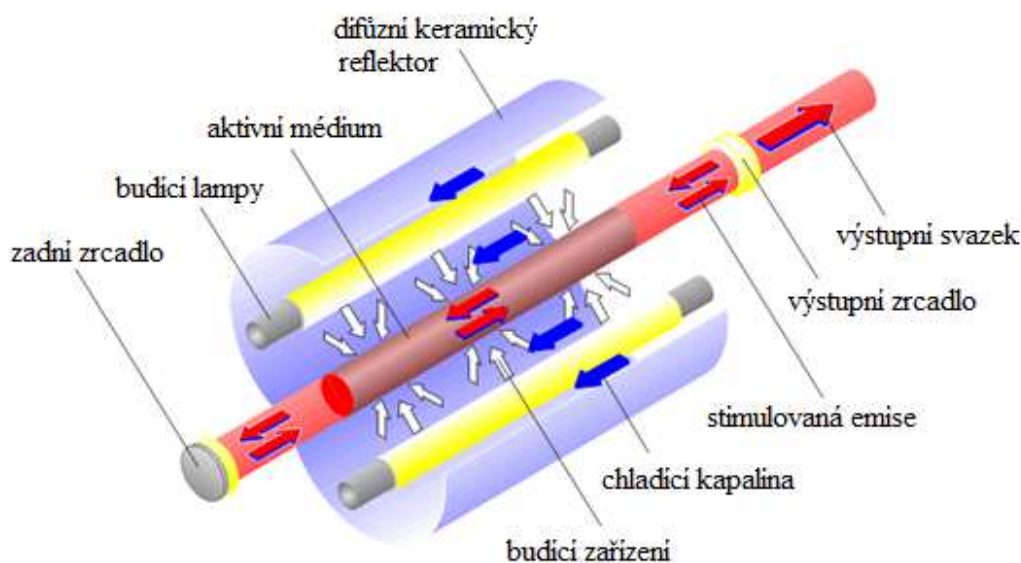


1) Nd:YAG laser, 2) diskový laser, 3) vláknový laser, 4) diodový laser. Význam šipek: modré - chlazení, zelené – buzení, fialové – svazek paprsku

Obr. 15 Pevnolátkové lasery [28]

Nejrozšířenější pevnolátkový laser je laser na bázi křišťálu Nd:YAG. Aktivním materiálem je izotropní krystal yttrium aluminium granátu ($\text{A}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný neodymem (Nd^{3+}). Krystal je zpravidla ve tvaru tyčky. Zařízení může pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Vyzařovaná vlnová délka nabývá hodnot 1,06 μm .

Lasery buzené kryptonovými výbojkami s bílým světlem mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, velká část energie výbojky se přemění na teplo a je nutné chlazení vodou (obr. 16). Nízká účinnost je způsobena vlnovou délkou kryptonových výbojek, která se pohybuje v rozmezí od 0,450 do 0,850 μm , a absorpční rozsah Nd:YAG laseru je od 0,790 do 0,830 μm . Lasery buzené výbojkami se používají převážně v pulzním režimu pro laserové svařování a vrtání. Jejich výhodou je vysoká energie pulzu. Nd:YAG laser buzený laserovými diodami má vyšší účinnost než laser buzený výbojkami a jeho svazek dosahuje lepší kvality. Laserové diody září v úzkém spektru absorpční čáry iontů Nd^{3+} a účinnost čerpání dosahuje až 45 %. Buzení diodami zvyšuje i životnost laseru a klade menší nároky na chlazení.



Obr. 16 Schéma Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [30].

Vlivem radiálních teplotních gradientů dochází k tepelné roztažnosti krystalu a jeho deformaci, která následně způsobí zhoršení kvality svazku. Tepelné deformaci krystalu lze omezit vhodnou geometrií aktivního prostředí, aby docházelo k rovnoměrnému ochlazování krystalu. Aktivní prostředí může být v podobě disku nebo optického vlákna.

V případě diskového laseru aktivní prostředí tvoří disk o tloušťce několika desetin milimetru. Jedná se o variantu Nd:YAG laseru. Diskový laser umožňuje rovinný teplotní profil, díky němuž může dosáhnout vyšších výkonů (až 16 kW) a dobrou kvalitou výstupního svazku. Výstupní výkon se dá řídit výkonem čerpacího zdroje nebo může být několik disků uspořádáno v sérii pro zvýšení výkonu. Nejvíce byly do série zapojeny 4 disky a byla zachována kvalita paprsku.

Konstrukce je řešena způsobem, že diskový krystal je uchycen na chlazení. Chlazení udržuje stálou teplotu krystalu (obr. 17). Buzení bývá prováděno diodami a vlnová délka vyzářeného paprsku má vlnovou délku 1030 nm. V matici je větší zastoupení Yb oproti Nd.



Obr. 17 Schéma diskového laseru [24].

Čerpací body na disku jsou relativně velké, diody užívané pro čerpání diskových laserů mohou mít relativně nízkou kvalitu paprsku. Naopak tomu diody používané ve vláknových laserech jsou směřovány do vláken s velmi malým průměrem, a proto vyžadují lepší kvalitu paprsku než u diskového laseru. Z toho vyplývá základní výhoda oproti vláknovým laserům v ceně čerpacích zdrojů.

Diskový laser má hlavní výhody:

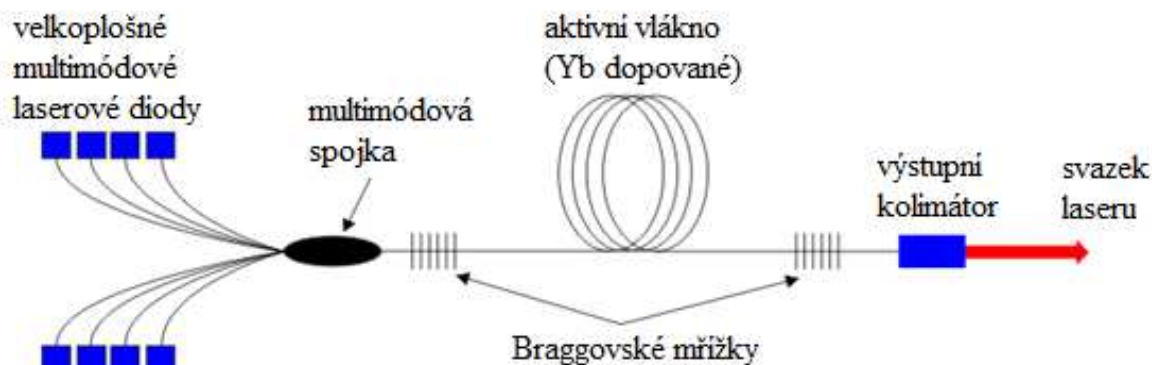
- skoro žádné zakřivení ploch krystalu tepelným namáháním,
- nízké požadavky diod na světlost,
- eliminuje problémy se zpětnými odrazy,
- změna výkonu při konstantní vnitřní hustotě energie.

Celková účinnost je v rozmezí 15 – 20% a je vyšší než u klasické konstrukce Nd:YAG laseru. Větší účinnosti i životnosti však dosahují vláknové lasery.

Vláknový laser je nejmodernější z pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí tvoří křemíkové optické vlákno o průměru jádra několik mikrometrů a dlouhé několik metrů dopované atomy erbia (Er) s vlnovou délkou 1060 – 1120 nm, ytterbia (Yr) o vlnové délce 1540 – 1620 nm nebo thuliem (Tm) s vlnovou délkou 1720 – 2000 nm. Vlákno má vysokou odrazivost a umožňuje paprsku šíření vláknem a stimuluje emisi záření, podélný řez vláknem je vidět na obrázku 18. Buzení je prováděno pomocí laserových diod, jejich záření je do aktivního prostředí přivedeno optickými vlákny přes optickou spojku. Rezonátor tvoří tzv. Braggovy mřížky, které jsou tvořeny pásy s odlišným indexem lomu, mřížka si při dostatečném počtu pásů chová jako zrcadlo a část záření odráží (obr. 19). Díky tomu, že vše je vedeno optickými vlákny, laser neobsahuje žádné optomechanické prvky jako zrcadla apod. Absence zrcadel snižuje nároky na údržbu a seřizování, celkově je laser skoro bezúdržbový. Čerpání laserovými diodami je velmi účinné, protože do jejich emisních pásů spadají absorpční čáry dopantů. Laser je tvořen moduly a jejich spojováním a přidáváním se může zvyšovat výkon (1 – 100 kW), jedná se o tzv. modulární zapojení. Vlastní svazek paprsku má vysokou kvalitu a fokusaci na malý průměr.



Obr. 18 Schéma aktivního prostředí vláknového laser [24]

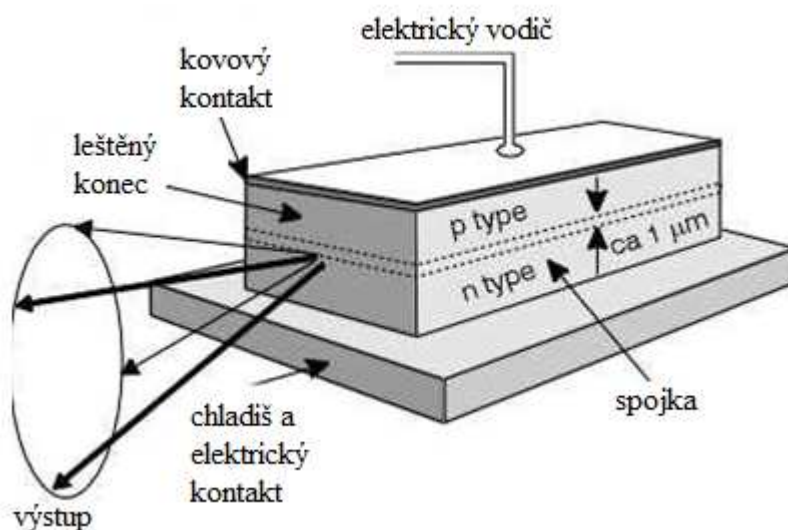


Obr. 19 Schéma vláknového laseru [13].

Účinnost buzení dosahuje hodnot až 80 %. Z důvodů velké délky a malého průměru aktivního prostředí je možné vzniklé teplo (ztrátové teplo) odvést bez nutnosti chlazení vodou a většinou se chladí jen vzduchem. Velkou výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost, celý laser tvoří optické vlákno. Vláknové lasery dosahují účinnosti kolem 30 – 35 % a extrémně velké životnosti, která se pohybuje až do 100 000 hodin. Ze všech výše uvedených laserů má vláknový laser nejnižší provozní náklady.

2.3.3 Polovodičové lasery [13], [18], [20], [28], [30], [36]

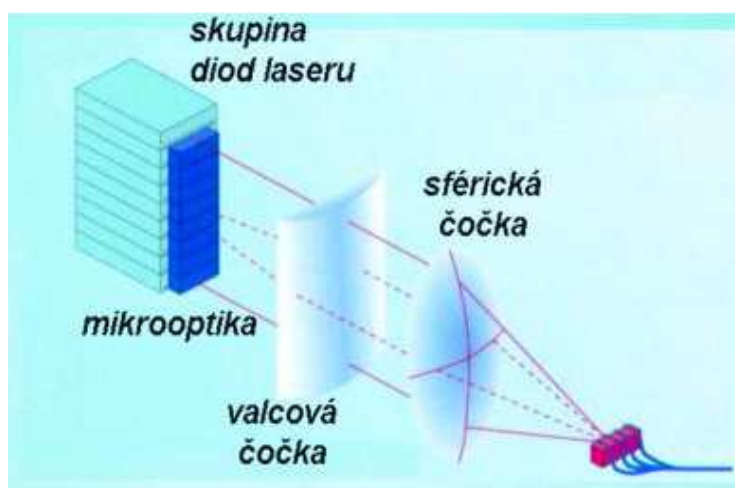
Polovodičový laser spadá do pevnolátkových laserů. V některých literaturách se uvádí jako diodový laser. Aktivní prostředí tvoří silně dopovaný polovodič, který přímo generuje záření. Aktivními částicemi jsou nerovnovážné elektrony a díry (volné nosiče náboje), které mohou být injektovány. Krystal s PN přechodem o ploše řádově 10^{-6} mm^2 je ve tvaru hranolu a jeho čelní plochy jsou kolmé na PN přechod (obr. 20). Buzení je realizováno elektrickým proudem. Vlnová délka výstupního záření je závislá na koncentraci legujících prvků v polovodiči a záření se pohybuje ve viditelné červené a blízké infračervené oblasti záření. Jediný polovodič dosahuje výkonu několika miliwattů. Vyššího výkonu se dosahuje spojením



Obr. 20 Schéma laserové diody [13].

laserových diod řad délky několika milimetrů a výkonu kolem 10 W. Řady diod se dále mohou spojovat do sloupců a bloků. V sestavě se dosahuje výkonu až 10 kW.

Vystupující svazek z rezonátoru má v horizontálním i vertikálním směru různý profil a divergenci, z tohoto důvodu se na stěnu bloku přidává válcová mikročočka. Z mikročočky vystupují již rovnoběžné svazky, které jsou dále fokusovány přes sférickou čočku (obr. 21).



Obr. 21 Konstrukce polovodičového laseru [36].

Ve srovnání s jinými lasery nedosahuje tak vysoké kvality svazku záření, proto se používá především v aplikacích, kde není nutné

svazek fokusovat na malý průměr (povrchové úpravy, svařování...). Například GaAs laser s generovanou vlnovou délkou 808 nm se využívá pro buzení Nd:YAG laserů.

Hlavními výhodami polovodičových laserů jsou nízká hmotnost, vysoká kompaktnost a možnost regulace výkonu změnou elektrického proudu. Lze dosahovat účinnosti až kolem 45 %.

V tabulce 3 je uveden základní přehled průmyslových laserů s dosahovanými parametry. Uváděné parametry jsou obecné a přibližné, slouží především pro přehled. U pulzních laserů je uváděn střední výkon.

Tab. 3: Základní princip průmyslových laserů [30].

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Efektiv. [%]	Režim	Výkon	Typické aplikace	Životnost [hod]
Nd:YAG	1 064	LD	~7	kontinuální	až 6 kW	Ř, S	~10 000
				pulzní	~100 W	Z, G	
		lampy	~3	pulzní	~600 W	S, V	~1 000
CO ₂	10 600	RF	~10	kontinuální/ pulzní	10 – 250 W	Zn, G, Ř nk.	~20 000
					až 5 kW	Ř, S	
		El.	~25		až 20 kW	Ř, S	--
Diskový	1 030	LD	~15	kontinuální	až 16 kW	Ř, S	~10 000
Vláknový	1 070	LD	~30	kontinuální	až 80 kW	Ř, S	~100 000
				kvazi kontinuální	~ 1,2 kW	Z, G, M	
				pulzní	~ 100 W	Z, G, M	
Polovodičový	808 - 980	El.	~50	kontinuální	až 10 kW	S, K, N	~15 000

Zkratky v tabulce znamenají: LD – laserové diody, RF – radio frekvenční, El. – elektricky, Ř – řezání, S – svařování, Zn – značení, G – gravírování, V – vrtání, K – kalení, N – nanášení vrstev, M – mikro obrábění, nk – nekovů. Efektivita v tabulce vyjadřuje účinnost přeměny elektrické energie na světelnou (optickou). Některé z aplikací jsou popsány v další kapitole.

2.3.4 Použití laserů [2], [19], [21], [22], [35], [36], [37], [39]

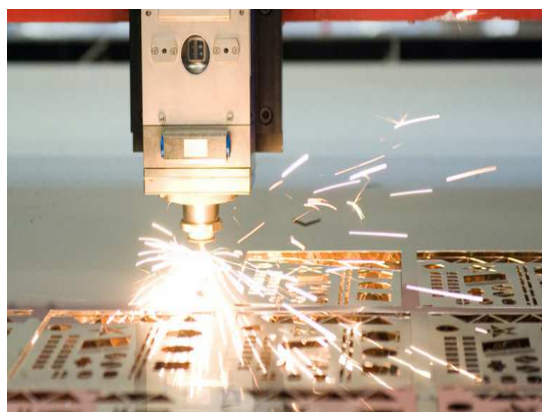
Lasery jsou dnes používány v mnoha odvětvích počínaje průmyslem, vědou a výzkumem, zdravotnictvím až po vojenské využití. Lze se s nimi setkat i v domácnosti například v počítačích atd.

Díky vlastnostem laseru se v průmyslu laser využívá pro mnoho technologických operací. Hlavní předností laserových technologických operací je možnost provádění operací na výrobku bez mechanického kontaktu. Laser umožňuje provádět operace na těžko přístupných místech součástí. Jednou z metod využití je svařování, které je podrobně rozloženo v další kapitole. Ostatní metody nejsou součástí práce, a proto budou popsány jen stručně.

- Řezání - hodně využívané jsou lasery pro řezání, kdy umožňují dělit materiály nehlédě na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti (obr. 22). Materiál je v místě řezu ohřátý na teplotu varu a okolní materiál je nataven. Roztavený kov se z místa řezu odstraní pracovním plynem. Podle použitého pracovního plynu se řezání laserem rozděluje na oxidační a tavné. U tavného řezání je roztavený kov z místa řezu vyfouknut inertním plynem a výsledný povrch řezu je kovově lesklý bez oxidů a oxidického zbarvení. Tavné

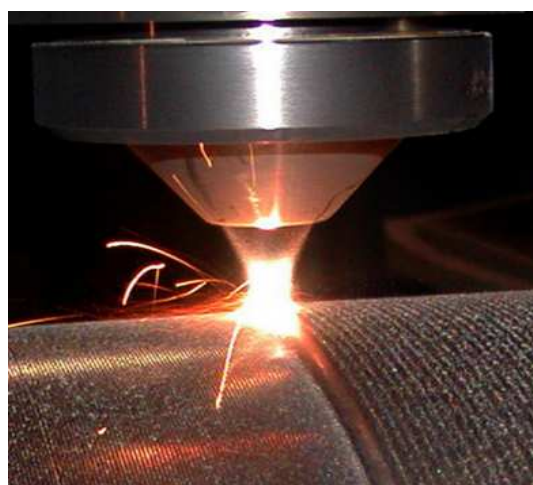
řezání je vhodné pro vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a pro nekovové materiály jako keramika nebo dřevo.

Při oxidačním řezání je jako pracovní plyn použit kyslík a roztavený kov shoří, nevýhodou je oxidace řezných hran. Oxidační řezání dosahuje výrazně vyšší řezné rychlosti a tloušťky řezu. Používá se pro nelegované až středně legované oceli. Další z metod je sublimace materiálu z místa řezu, která je vhodná pro tenké plechy a používá se především pro řezání a vrtání materiálů.

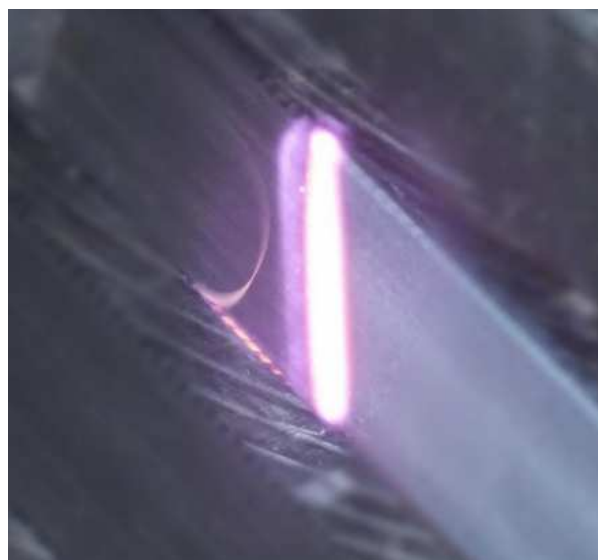


Obr. 22 Řezání laserem [37].

- Navařování - laser při navařování funguje jako zdroj tepla. Přídavný (navarováný) materiál je do místa navařování přiváděn v podobě drátu nebo prášku, kde je nataven k povrchu součásti. Touto metodou vznikají kvalitní povlaky bez defektů a trhlin (obr. 23).
- Kalení - pro kalení laserem se používají CO₂ lasery, Nd:YAG laser, vláknové a výkonné diodové lasery. Růst teploty při této metodě kalení je více než 1 000 K/s a výdrž na teplotě se pohybuje řádově od 10⁻³ až 10 sekund. Kalení většinou probíhá za atmosférických podmínek a odvod tepla zajišťuje tepelná vodivost materiálu. Oxidaci povrchu je možno zabránit použitím ochranného plynu. Výhodou laseru je možnost lokálního kalení na požadovaném místě a nízké tepelné zatížení okolního materiálu. Velmi dobře se dá řídit hloubka prokalení a výsledná tvrdost. Teplota povrchu součásti bývá měřena kamerou, vyhodnocena a následně systém upravuje výkon laseru, čímž se dosahuje dodržení teploty s přesností cca ± 10 K. Na obrázku 24 je vidět průběh laserového kalení ozubeného hřebene s jasně patrným laserovým svazkem, kdy laserový paprsek postupuje zdola nahoru a v dolní části obrázku je zřetelně vidět zakalená část hřebene.



Obr. 23 Navařování laserem [22].



Obr. 24 Laserem kalený ozubený hřeben [22].

Další z metod využití laseru je rapid prototyping, kde je laser využit k vytvrzování jednotlivých vrstev nanášeného materiálu. Dále se dá laser použít pro texturování ploch součástí, leštění povrchů, gravírování (mikrofrézování).

2.4 Laserové svařování [2], [4], [8], [10]

Svařování laserem přináší spoustu výhod. Umožňuje svařovat tloušťky materiálu od několika mikrometrů až do desítek milimetrů. Při svařování laserem se soustřeďuje vysoká hustota výkonu na malou plochu, tím se do materiálu nepřivádí tolik tepla a tepelně ovlivněná oblast je v porovnání s jinými metodami menší. Dosahuje se vysokých rychlostí svařování. Většinou se svařuje bez přídavného materiálu, ale je umožněno svařovat i s přídavným materiálem ve formě drátu. Porovnání parametrů s některými metodami je uvedeno v tabulce 4.

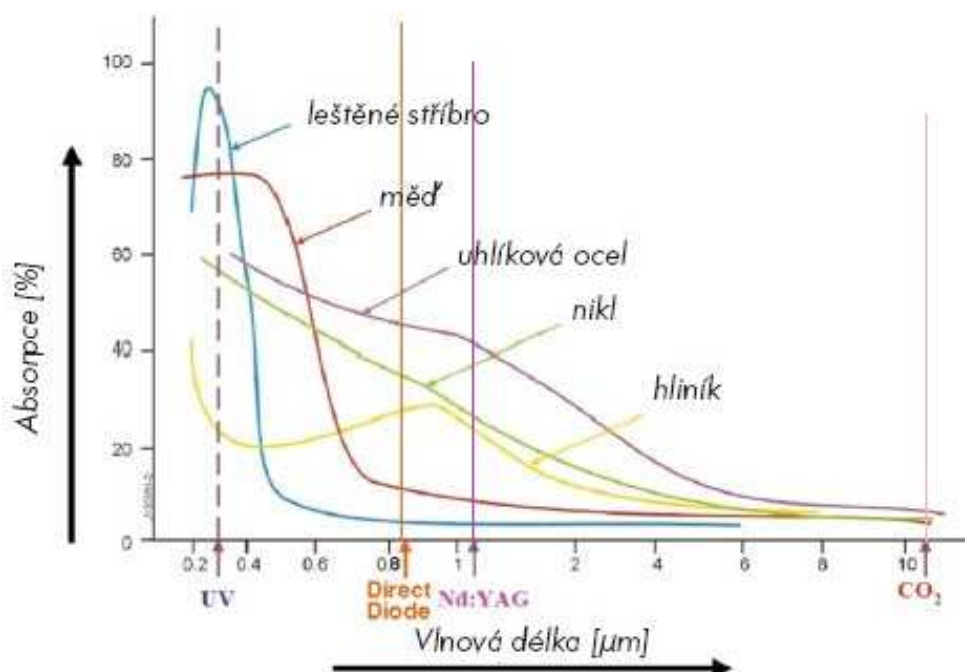
Tab. 4: Srovnání metod svařování [8].

Metoda	Hustota energie [W/cm^2]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru [-]	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	10^7 - 10^9	10	0,1 – 0,5	10
Plamen	10^3	3	3	0,01
El. oblouk	10^4	4	2	0,5 – 3
Plazma	10^6	6	1	0,5 – 5
El. paprsek	10^8	50	0,03	0,5 - 5

Laserové svařování umožňuje svařovat velkou škálu materiálů a jejich kombinací. Umožňují svařovat materiály s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag, Al,...) i materiály s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr, Ti,...). Výborné výsledky se dosahují u svařování vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu atd.

2.4.1 Interakce záření s materiálem [2], [4], [18], [19]

Foton jako kvantum energie při dopadu na materiál přímo zvyšuje frekvenci vibrací mřížky a tím dochází ke zvyšování teploty materiálu v místě dopadu laserového paprsku. Energie záření dopadající na povrch materiálu je částečně odražena a zbývající část záření je pohlcena a využita k ohřevu materiálu. Menší část záření materiálem prochází. Absorpce materiálu závisí na teplotě materiálu a vlnové délce vyzařovaného paprsku (obr. 25).



Obr. 25 Absorpce záření v kovech [19].

Na hodnotu absorpce má významný vliv i stav povrchu (leštěný povrch má nízkou absorpci, hrubý povrch vysokou). Hloubka průniku záření závisí na výkonu zdroje, vodivosti materiálu a frekvenci záření.

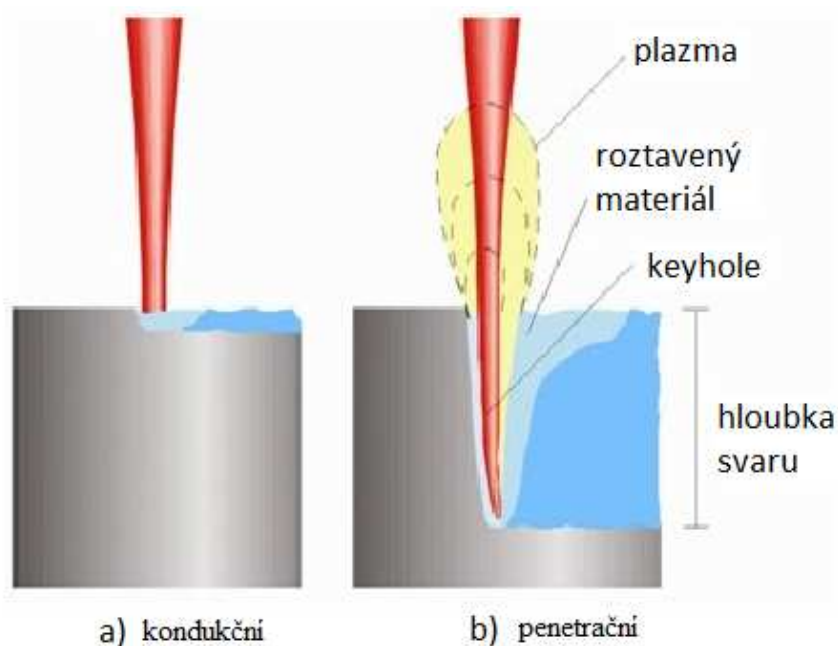
Na čistotu povrchu svařovaného materiálu nejsou kladeny velké požadavky. Veškeré nečistoty a mastnoty jsou před natavením svarové plochy odpařeny.

Rozlišují se dva účinky laserového svazku na materiál:

- kondukční,
- penetrační (key hole).

Kondukční svařování pracuje při malých hustotách výkonu do 10^6 W/cm^2 , kdy k přenosu tepla a formování svarové lázně dochází vedením. Dochází k minimálnímu odpaření materiálu. Šířka svaru je vždy větší než hloubka a tepelně ovlivněná oblast je větší než u penetračního svařování. Umožňuje svařování jen do relativně malé hloubky průvaru a je vhodné pro svařování tenkých plechů a fólií.

Při penetračním svařování se zvyšováním plošné hustoty výkonu dosáhne kritické hodnoty, kdy dojde k tvorbě par kovů nad povrchem svařovaného materiálu. Působením fokusovaného laserového paprsku se vytvoří plazma a dochází k hlubokému provaření. Laserovým paprskem vytvoří kapiláru, která je vyplněna párami kovů pod vysokým tlakem. Kapilára dosahuje průměru 1,5 – 2 násobek průměru ohniska laserového svazku. Plyny vystupují z kapiláry a zabraňují jejímu uzavření. Ze stěn kapiláry se vedením dostává energie do taveniny a dále do tuhého materiálu. Tím může paprsek pronikat hluboko do materiálu a vzniká tzv. „key hole“. Uvnitř kapiláry dochází k mnohonásobné reflexi, která zlepšuje absorpci v místě dopadu laserového svazku (vzniká úzký a hluboký svar). Rozvoj kapiláry se zastaví, když hustota výkonu vlivem divergence paprsku a absorpce stěnami klesne pod kritickou hodnotu danou ztrátami tepla, odvodem do okolí a vypařováním materiálu. Při svařování s velkou hloubkou penetrace vznikající tavenina (na čele), v důsledku dynamické rovnováhy tlaku plynů, par a tekutého kovu, proudí okolo stěn kapiláry na zadní stěnu. Na zadní stěně se tavenina slévá, zaplní volný prostor a tuhne. Svařování kondukční a penetrační je porovnáno na obrázku 26.



Obr. 26 Mechanismy laserového svařování [18].

Plazma na povrchu ovlivňuje tvar kapiláry, brání pronikání fotonů do svarové spáry, pohlcuje velkou část záření a snižuje hloubku průvaru. Plazma se může vychylovat proudem (ofukováním) ochranného plynu Ar, Ar + CO₂, N₂ nebo He, který vykazuje nejlepší výsledky. Ochranný plyn zároveň chrání tavnou lázeň před oxidací vzdušným kyslíkem.

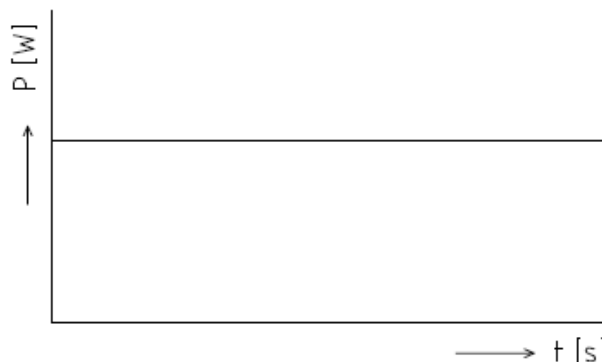
2.4.2 Parametry svařování [2], [4], [10], [46]

Parametry svařování ovlivňují kvalitu svaru. Tyto parametry podmiňují efektivnost využití laseru v technologických procesech. Režim svařování lze rozdělit na kontinuální a pulzní.

Základní parametry kontinuálního režimu svařování jsou:

- výkon laserového paprsku P [W],
- rychlost svařování v [mm/s],
- parametry fokusačního systému.

Výkon laseru vyjadřuje záření zaměřené do fokusačního systému. Jeho velikost ovlivňuje hloubku a šířku svaru. Hloubku svaru zvýšíme vyšším výkonem. Průběh výkonu laseru při kontinuálním režimu je na obrázku 27.



Obr. 27 Průběh výkonu laseru při kontinuálním režimu [46].

Rychlost svařování označuje dráhu, kterou zdroj ohřevu v dotyku s materiálem přejede za jednotku času. Při konstantní hodnotě výkonu rychlost svařování charakterizuje množství energie dodané materiálu. Rychlost svařování ovlivňuje geometrii svaru, strukturu, vlastnosti a chemické složení materiálu v tepelně ovlivněné oblasti.

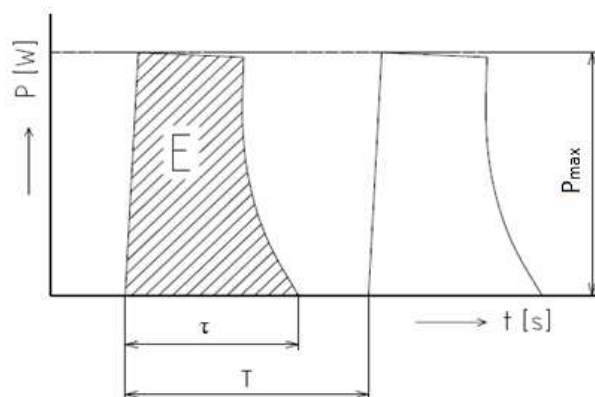
Parametry fokusačního systému jsou charakterizované průměrem fokusovaného paprsku, uspořádáním čoček nebo objektivu, konstrukcí fokusačního systému a divergencí paprsku.

Průvodní parametry jsou:

- dodaná energie – vyjadřuje energii použitou na jednotku délky $Q = P/v$ [J/m],
- hustota výkonu – působení výkonu paprsku na plochu [W/cm^2],
- druh a průtok ochranného plynu.

Pulzní režim produkuje záření v krátkých oddělených dávkách – pulzech. Průběh výkonu laseru při pulzním režimu je zobrazen na obrázku 28. Odlišné jsou i parametry, které jsou používány na popis charakteristik paprsku:

- energie pulzu E_i [J],
- maximální výkon pulzu P_{max} [W],
- délka pulzu τ [s],
- frekvence pulzu F [Hz],
- tvar pulzu $P = f(t)$,
- průměr fokusovaného paprsku d [mm],
- vzdálenost ohniska od povrchu materiálu s [mm],
- rychlost svařování v [mm/s].



Obr. 28 Průběh výkonu laseru při pulzním režimu [4].

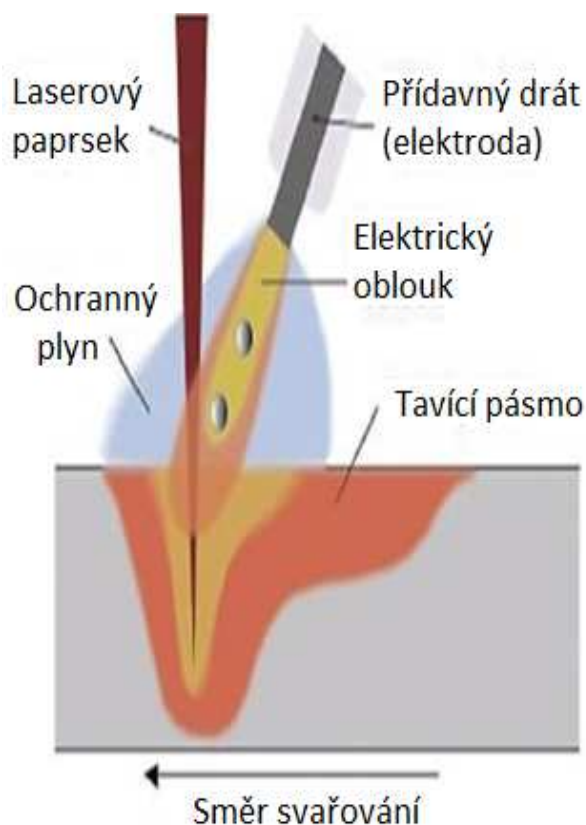
Pokud je hustota výkonu pod kritickou hodnotou, probíhá celý proces svařování v tavném režimu bez přítomnosti paroplynové kapiláry a je možno svařovat do velmi malé hloubky.

Po překročení kritické hodnoty hustoty výkonu vznikají páry a plazma, která zapříčiní vznik kapiláry, a je možno zaručit hluboké protavení. Při milisekundových délkách impulzů jsou dosahovány výkony v řádu kW.

2.4.3 Hybridní metody [16], [44]

Kombinace metod svařování laserovým paprskem a jinými svařovacími procesy (MIG/MAG, WIG, plazma).

Nejpoužívanější je kombinace laser + MIG/MAG (schéma obr. 29). Laserový paprsek a elektrický oblouk se používají jako kombinovaný zdroj energie. Hybridní svařovací hlava je opatřena laserovou svařovací optikou s adaptovaným hořákem pro svařování v ochranné atmosféře MIG/MAG (obr. 30). Přídavná tavná elektroda procesu MIG/MAG umožňuje překlenout větší rozestupy mezer, zvýšit tepelnou účinnost a rychlost svařování. Při svařování vysokopevnostní oceli se díly většinou nemusí vůbec předehřívat na rozdíl od svařování elektrickým obloukem. Deformace svařovaných dílů je zásadně menší než u ostatních svařovacích metod.



Obr. 29 Schéma hybridního svařování [16].



Obr. 30 Hybridní svařovací hlava [16].

Kombinace laser + WIG je principiálně stejná jako výše uvedená metoda. Liší se jen využitím, kdy laser + WIG je vhodný zejména pro slitiny hořčíku a korozi-vzdorné oceli.

V kombinaci laser + plazma je plazma využívána pro předehřev. Dosahuje se vyšších výkonů než při svařování samotným laserem. Dochází k pomalejšímu ochlazování a zlepšuje se přesnost a kvalita svaru.

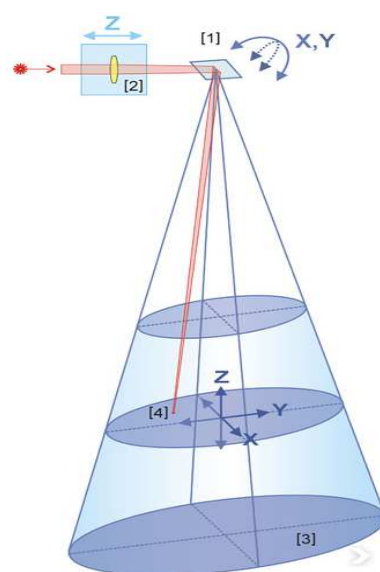
2.4.4 Skenerové svařování [23], [29], [42]

Při skenerovém svařování je paprsek veden prostřednictvím pohyblivých zrcadel. Změnami úhlů natočení zrcadel je paprsek řízen. Pojžděním přidavného čočkového systému lze bod ohniska posouvat dynamickým pohybem i ve směru Z (obr. 32). Díky velmi rychlému přesouvání téměř odpadají prostoje a přístroj může vyrábět s využitím nad 90 % disponibilního výrobního času. Během svařování lze navíc skenerovou optiku ve spojení s robotem vést nad obrobkem, robot a skenerová technika synchronizují své pohyby, tím je výrazně zvětšen pracovní prostor a je umožněno trojrozměrné svařování součástí. Svařování může probíhat díky rozmitání paprsku zrcadly nebo se mohou zrcadla zafixovat a pohyb paprsku je realizován pouze pohybem robota.



Obr. 31 Skenerová hlava [29].

Příklad skenerové hlavy s modulem pro připojení optického vlákna je znázorněn na obrázku 31. Hlavní výhodou skenerového svařování je lepší produktivita vůči konvenčním postupům.



Obr. 32 Princip skeneru [42].

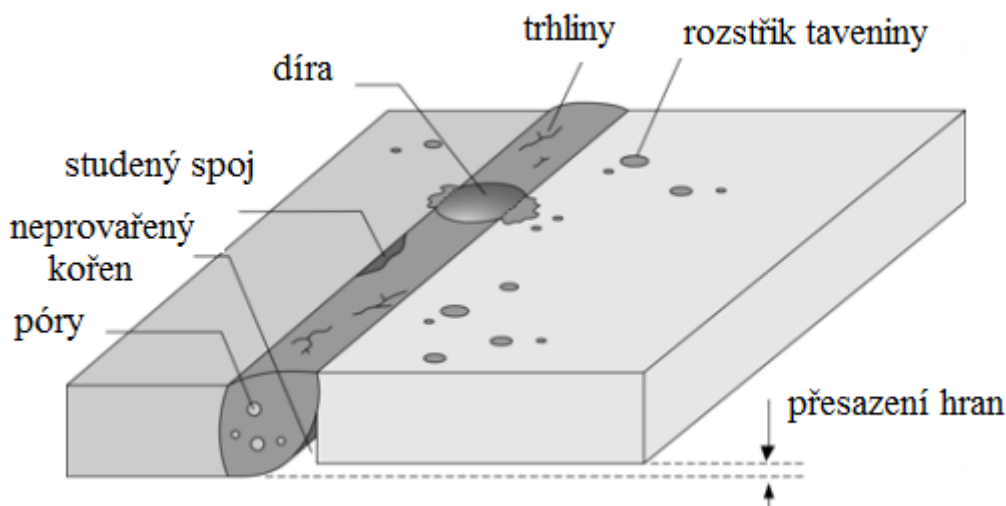
Další výhody skenerového svařování jsou:

- konstantní rychlost pohybu svazku po kontuře (i při změně směru),
- stabilní proces díky velké pracovní vzdálenosti,
- snadná schopnost svařování v těžko přístupných místech.

Jako zdroj paprsku se používají výkonné diskové nebo vláknové lasery s vysokou kvalitou paprsku. Velikost pole zpracování skenerové optiky a dosažitelná pracovní vzdálenost závisí přímo na kvalitě paprsku.

2.5 Svarové vady [9], [46]

Za vadu ve svaru se označuje jakákoliv odchylka od vlastností stanovených normami nebo jinými podmínkami. Vady nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti svarového spoje, jsou koncentrátory napětí a mohou se v nich iniciovat trhliny. K dalšímu zpracování nebo užívání se připouští pouze svary bez vad nebo s přípustnými vadami. Přípustné vady jsou vady, které normy nebo podmínky dovolují, a není potřebné jejich odstranění. Přípustnost vad závisí na jejich druhu, velikosti a množství výskytu pro danou aplikaci svařené součásti. Nepřípustné vady jsou ty, které přesahují povolené hodnoty (mohou být opravitelné nebo neopravitelné). Možné svarové vady vzniklé při svařování laserem jsou znázorněny na obrázku 33. Při svařování tenkých fólií, kdy je potřeba dodržet konstantní vzdálenost mezi svařovanými plechy (pohybuje se v rozmezí desetiny tloušťky svařovaného materiálu), dochází nejčastěji k nepřesnosti nastavení a možnému přesazení hran



Obr. 33 Svarové vady, které mohou nastat při svařování laserem [46].

Vady vyskytující se ve svarovém spoji a návaru lze rozdělit do dvou základních skupin: na plošné (trhliny, neprůvary, studené spoje) a objemové (póry, vměstky, vruby). Dále se dají dělit podle místa výskytu na povrchové nebo vnitřní.

Názvy a popis vad ve svarech provedených tavným svařováním obsahuje norma ČSN EN ISO 6520 – 1. V této normě jsou vady rozčleněny do šesti skupin (trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje a neprůvary, vady tvaru a rozměru, jiné vady).

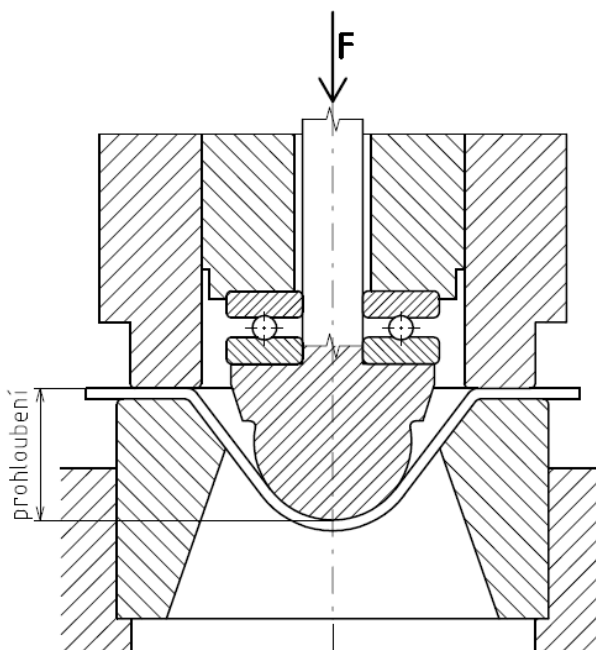
2.6 Zkoušky svarového spoje [14], [25], [45]

Slouží ke zjištění kvality svarového spoje, popřípadě ke zjištění vlastností použitých materiálů. Zkouškami lze detekovat vady v materiálu i strukturní stav po svaření, což umožňuje vyvarovat se selhání funkce součásti v následném provozu nebo při dalším zpracování (metalografické a mechanické zkoušky jsou důležité pro stanovení pevnostních limitů součástky). Vyhodnocení zkoušek umožní optimalizovat proces svařování, tak aby docházelo k co nejmenšímu počtu zmetků (svařenců bez vad nebo s přípustnými vadami), vhodně zvolenými procesními parametry.

Zkoušení svarových spojů se dělí na zkoušky destruktivní a nedestruktivní. Při destruktivní zkoušce dochází k porušení materiálu, při nedestruktivní je součást zkoumána bez porušení. Existuje celá řada zkoušek, avšak tato práce se níže zabývá jenom těmi, které byly využity pro vyhodnocení svařených vzorků. Popisovat ostatní metody není relevantní.

- Zkouška tahem - destruktivní zkouška k ověření pevnostních a plastických charakteristik. Provádí se na normalizovaných tyčích (v případě svařování plechů jsou zkušební tyče ploché), které jsou umístěny v trhacím stroji. Za definovaných podmínek (teplota, rychlost deformace) je zkušební vzorek ve stroji namáhán jednoosým tahovým zatížením od nulového zatížení až do bodu přetržení vzorku. Výsledkem této zkoušky je tzv. tahový diagram (závislost napětí na deformaci nebo síle na prodloužení). Z průběhu diagramu lze definovat: pevnost v tahu R_m [MPa] (maximální dosažené zatížení), tažnost A [%] (poměrné prodloužení vyjádřené v procentech), kontrakce Z [%] (poměr rozdílu počáteční plochy a nejmenší plochy příčného průřezu po přetržení k počátečnímu průřezu), mez kluzu R_e případně smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] (napětí, při kterém se vzorek deformuje, aniž by se zvyšovala zatěžující síla). Příčnou zkoušku tahem pro zkoušení svarů kovových materiálů předepisuje norma ČSN EN ISO 4136.

- Hloubení podle Erichsena - ověřuje se vhodnost plechu k ohýbání, hlubokému tažení i po svaření plechu. Zkouška spočívá v principu zatlačení ocelového trnu s kulovitým koncem do zkušebního tělesa (plech s provedeným svarem). Trn se vtlačuje do hloubky, dokud na vzorku nevznikne průchozí trhлина. Výstupem zkoušky je změřená hloubka průniku trnu v závislosti na tloušťce plechu. Hloubka průniku je dráha, kterou trn vykoná z nulové polohy do polohy, ve které se objevuje trhлина. Hodnota průniku je charakteristikou materiálu a označuje se IE. Zkoušku hloubení podle Erichsena pro kovové materiály popisuje norma ČSN EN ISO 20482. Zkouška je znázorněna na obrázku 34 i se zakótovaným měřeným prohloubením.



Obr. 34 Zkouška hloubení podle Erichsena [14].

- Metalografické šetření - používá se pro ověření stavu struktury svarových spojů a tepelně ovlivněné oblasti. U této metody je důležitá příprava vzorku. Odebraný vzorek (nejčastěji v příčném řezu) by měl zahrnovat svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast i základní materiál. Příprava zahrnuje broušení studovaného povrchu na metalografických papírech s klesající zrnitostí, leštění a leptání povrchu chemickým nebo elektrolytickým postupem. Metalografické zkoušky lze rozdělit podle použitého zvětšení při pozorování na makroskopickou a mikroskopickou kontrolu.

Makroskopický rozbor je prováděn pouhým okem ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení (lupou, optický mikroskop do zvětšení cca 30x). Hodnotí se především tvar svaru, odmíšení svarového kovu, šířka a charakter tepelně ovlivněné oblasti, hranice ztavení.

U mikroskopické kontroly se zkoumá mikrostruktura materiálu při zvětšení až 2000 x. Posuzuje se rozložení základních strukturních fází, míra zhrubnutí zrna pásem tepelně ovlivněné oblasti i svarového kovu.

2.7 Struktura austenitických ocelí [11], [25], [34]

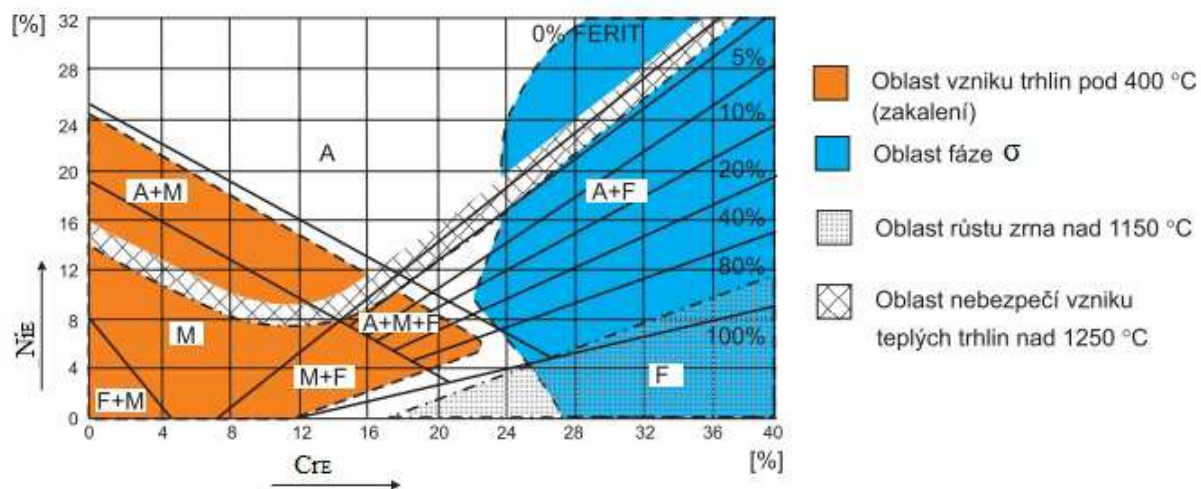
K odhadu výsledné struktury Cr – Ni austenitických ocelí lze použít konstituční diagramy. Z nichž nejznámější je Schaefflerův diagram aplikovatelný pro ocel s nízkým obsahem dusíku, který zahrnuje vliv feritotvorných a austenitotvorných prvků na strukturu oceli. Chromový ekvivalent (Cr_E) zahrnuje vliv všech feritotvorných prvků a ekvivalent niklu (Ni_E) zahrnuje vliv všech austenitotvorných prvků.

Chromový a niklový ekvivalent každý autor uvádí odlišně. Pro zjištění struktury ze Schaefflerova diagramu se ekvivalenty spočítají podle vztahů (2.4) a (2.5).

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad [hm. \, \%] \quad (2.4)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad [hm. \, \%] \quad (2.5)$$

Na obrázku 35 je Schaefflerův diagram s vyznačenými oblastmi struktur A – austenit, M – martenzit a F – ferit.



Obr. 35 Schaefflerův diagram [11].

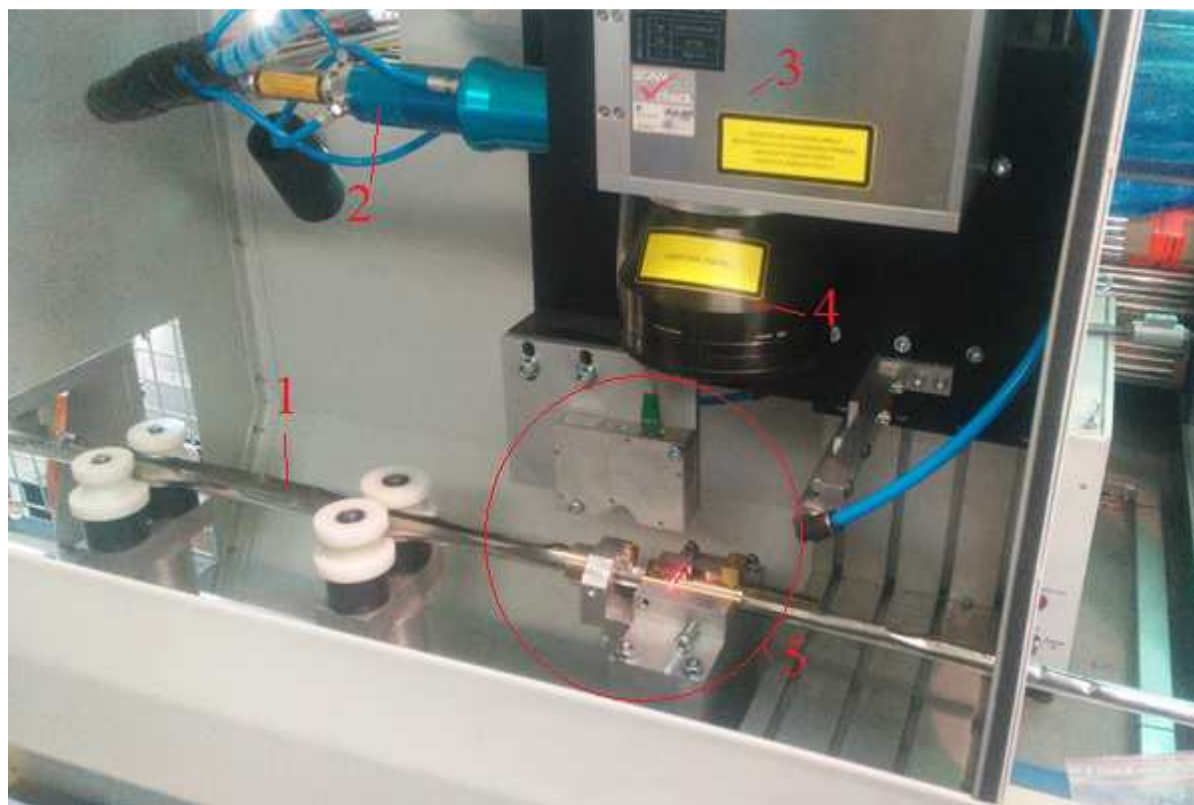
Obsah δ feritu je rozhodující pro snížení náchylnosti austenitické oceli k tvorbě teplých trhlin. Ideální obsah ve svarových kovech se pohybuje v rozmezí 2 – 6 hm. %. Vyšší obsahy vedou ke snížení antikoročních vlastností a podporují vznik křehké σ -fáze. Ze Schaefflerova diagramu vychází Siefertův vzorec (2.6) pro výpočet δ feritu v Cr – Ni austenitické oceli.

$$\% \delta \text{ feritu} = 3 \cdot (Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) \quad [hm. \%] \quad (2.6)$$

3 EXPERIMENT [43]

Experiment spočívá v porovnání kvality svaru a parametrů svařování mezi stávající technologií svařování plazmou a novou technologií svařování laserem. Na svařených vzorcích se provedly tahové zkoušky, hloubení podle Erichsena a metalografický rozbor.

Pro svařování laserem byl firmou zakoupen vláknový laser. Použit je ytterbiový vláknový zdroj IPG YLS - 1000 chlazený vodou o výkonu 1000 W v kontinuálním režimu. K přenosu laserového svazku do procesní optiky je použito flexibilní optické vlákno typu QBH. U tenkých plechů je potřeba svazek laserového paprsku zacílit přesně mezi svařované plechy. V tomto případě je plech zakroužen na válcích a v přípravku jsou k sobě hrany plechu přitlačeny na dotyk. Aby bylo zaručeno vedení paprsku přesně na styk hran, je laser vybaven skenerovou hlavou SCANLAB intelliSCAN® 20 s objektivem F - theta, která rozmítá paprsek v ose z, s maximálním zpožděním 0,32 ms. Pro navádění paprsku na svařovací linii je ještě nutný profilový skener. Je použit skener MetraLight, který snímá přesnou polohu styku hran s přesností v ose z 1 μm . Naměřené údaje z profilového skeneru jsou potom přes software k řízení procesní optiky přenášeny do skenerové hlavy, která následně posune polohu osy paprsku na podélnou osu styku hran.



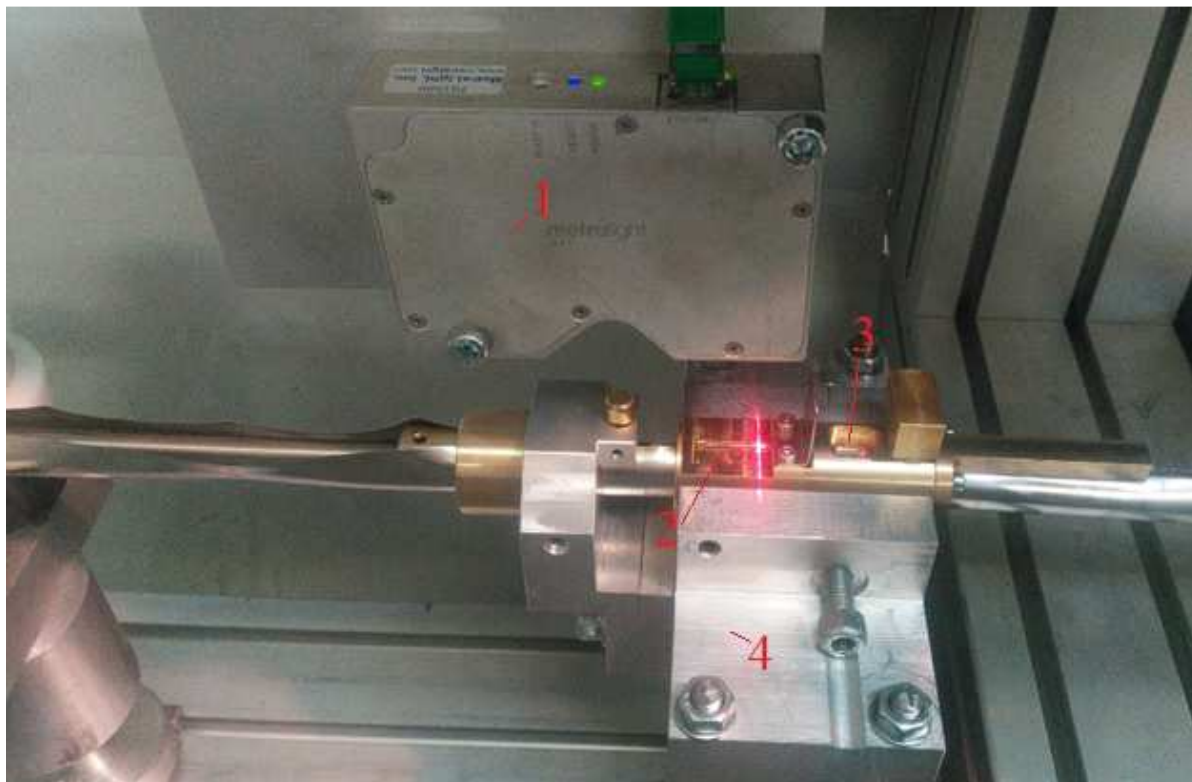
1 – svařovaný materiál, 2 – optické vlákno, 3 – skenerová hlava, 4 – objektiv,
5 – detail (obr. 36)

Obr. 36 Svařovací linka laseru.

Na obrázku 36 je vidět svařovací zařízení laseru přímo z výroby. Zleva přichází pás plechu, který je přes válce zakružován. Následuje přípravek k udržení přesné polohy zakrouženého plechu při svařování, vpravo je už výstup svařené trubky. Vlevo nahoře obrázku je optický kabel zapojený do skenerové hlavy s namontovaným objektivem.

Na další obrázku (obr 37) je detail přípravku s profilovým skenerem. V přípravku jsou dva otvory. První zleva slouží po snímání polohy hran plechu a případné mezery mezi nimi (na obrázku je vidět paprsek vycházející z profilového skeneru). Ve druhém otvoru prochází

paprsek laseru do svarového místa. Přípravkem je přiváděn ochranný plyn pro ochranu kořene a hlavy svaru. Vpravo je možno vidět výstupek přípravku na horní straně trubky, který slouží k vedení ochranného plynu ještě do určité vzdálenosti od místa svařování.



1- profilový skener, 2 – otvor pro snímání polohy, 3 – otvor pro svařování, 4 - přípravek

Obr. 37 Detail přípravku pro svařování laserem.

V tabulce 5 jsou uvedeny svařovací parametry, při kterých byly svařeny vzorky mikroplazmovým svařováním. V příloze 3 je přiložena WPS pro tloušťku plechu 0,25 mm, pro plech 0,15 mm nebyly svařovací údaje dodány.

Tab. 5: Svařovací parametry pro svařování mikroplazmu [43].

tloušťka materiálu [mm]	proud [A]	svařovací rychlost [m/min]
0,25	9,5±1	1,5
0,15	-	-

Použité parametry při svařování laserem jsou uvedeny v tabulce 6. Z porovnání údajů v tabulkách 5 a 6 vyplývá, že bylo laserovým svařováním dosaženo několikanásobně větší rychlosti svařování. Pro plech o tloušťce 0,25 mm je rozdíl 10x větší.

Tab. 6: Svařovací parametry pro svařování laserem [43].

tloušťka materiálu [mm]	výkon [W]	svařovací rychlost [m/min]
0,25	1 000	15
0,15	300	2
0,15	400	4

Dodané vzorky firmou Elasteflex byly ve formě svařených trubek o průměru 59 mm pro tloušťku 0,25 mm a o průměru 17 mm pro tloušťku 0,15 mm. Jedna trubka byla svařena stávající technologií mikroplazmou a druhá laserem, přičemž u laseru pro tloušťku plechu 0,15 mm byly svařeny dvě trubky s odlišnými parametry. Pro provádění experimentů bylo

nutné vzorky upravit. Svařená trubka byla podélně rozříznuta laserem na druhé straně od svarového spoje, tak aby se svar nacházel na středu rozřízlého plechu. Navíc byl do trubky vložen pás plechu pro odstranění tepelného ovlivněného místa svaru při řezání. Následně byl pás plechu narovnan pomocí válcové rovnačky. Poslední příprava vzorků spočívala v jejich nastříhání z vyrovnaného plechu na dané rozměry pro daný experiment.

3.1 Zkouška tahem [48]

Tahové zkoušky byly provedeny na hydraulickém zkušebním stroji ZD40/400kN/ (obr. 38). Na stroji se dají provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Vybavení se skládá ze snímače síly s řídicí jednotkou EDC 60 (obr. 39) a vestavěného inkrementálního délkového snímače polohy příčnicku, který dosahuje rozlišení 0,01 mm.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce přesné elektronické zařízení konstruované speciálně pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Jednotka disponuje programem pro zkoušky kovů s možností realizovat zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez využití průtahoměru.

Technické parametry:

- výrobce: HBM/SRN/
- měřicí rozsah: $8 \div 400$ kN
- chyba měření síly: $1/100$ jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$
odpovídá třídě přesnosti 1
- měřicí rozsah měření dráhy: $0 \div 280$ mm
- chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napájení snímače dráhy.

Pro vyhodnocení výsledků a grafické zpracování testu je počítač vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2.



Obr. 38 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/ [48].

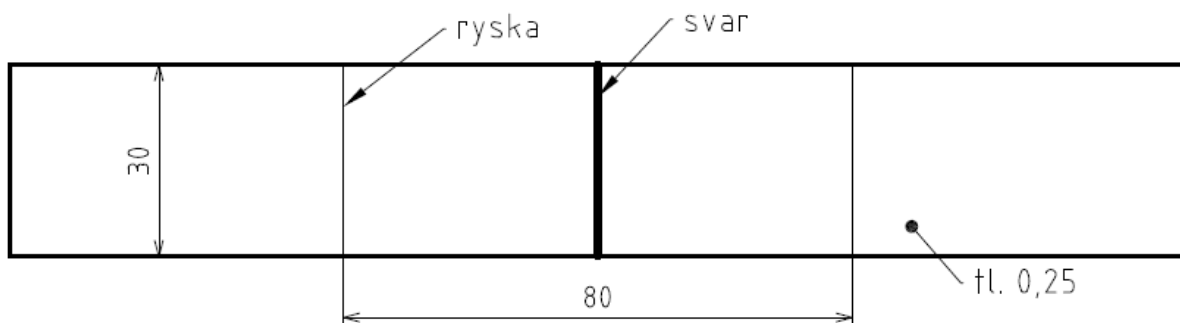


Obr. 39 Řídicí jednotka EDC 60 [48].

3.1.1 Zkouška tahem pro vzorky tloušťky 0,25

Z plechů se na pákových nůžkách nastříhaly pásy plechu o šířce 30 mm, na kterých se následně prováděla zkouška. Pro každou svařovací metodu se nastříhaly 4 vzorky. Pro určení tažnosti se na vzorky ještě před zkouškou narýsovaly rysky ve vzdálenosti 40 mm od svaru. Po provedené zkoušce se vzdálenost rysek změřila a zanesla do programu. Vzorek pro tahovou zkoušku je vykreslen na obrázku 40. Tvar a rozměry vzorků byly zjednodušeny a neodpovídají zkušebním vzorkům, které předepisuje norma. Pro účely zjištění, zda nedojde

k přetržení v místě svaru nebo tepelně ovlivněné oblasti, jsou však zjednodušené vzorky dostačující.

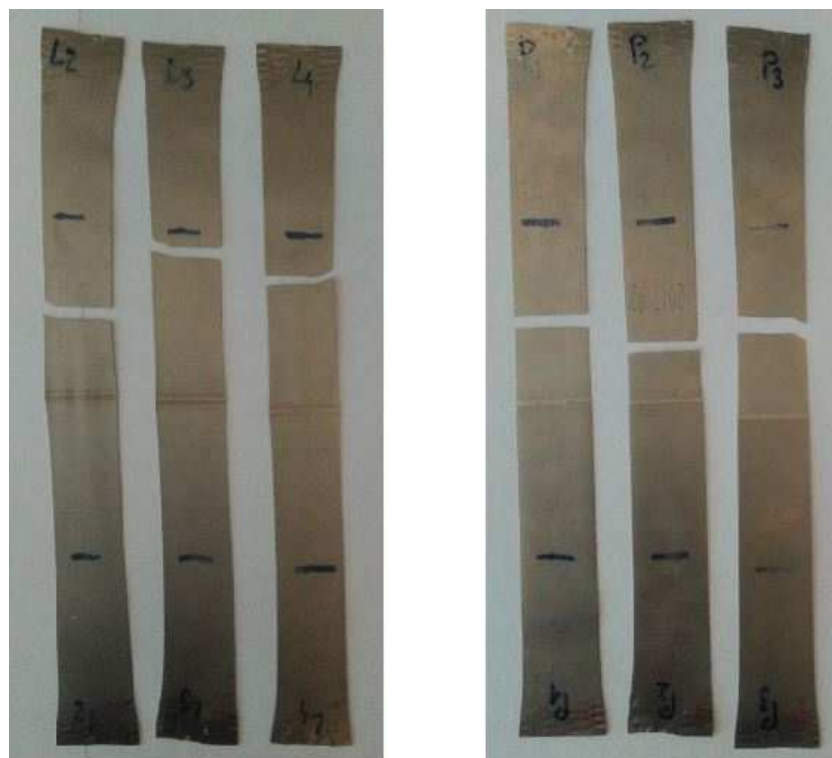


Obr. 40 Vzorek tl. 0,25 pro tahovou zkoušku.

Průběh zkoušky spočíval v upnutí vzorků do kleštin stroje, nastavení rychlosti zatěžování a spuštění zkoušky. Stroj a jeho kleštiny nejsou primárně určeny pro zkoušení tenkých plechů s tloušťkou řádově v desetinách milimetru. Při upínání nastával problém, kdy se vzorek lehce prohnul. Než došlo k napnutí vzorku, stroj běžel naprázdno.

Hned u prvního vzorku byla nastavena příliš nízká rychlost zatěžování. Vzorek se nakonec vytrhnul z kleštin a výsledná data se nehodila ke zpracování. Pro další vzorky se zatěžovací rychlost upravila na 5 MPa/s. Z těchto důvodů jsou data zpracována pro tři vzorky. Získaná data ze zkoušek byla upravena v programu Excel.

Na obrázku 41 jsou vzorky po provedené zkoušce. Vzorky označené „L_x“ jsou svařené laserem a vzorky s označením „P_x“ mikroplazmou. Z obrázku je patrné, že ve všech případech nastalo porušení mimo oblast svaru. Při porušení vzorku mimo svar a tepelně ovlivněnou oblast je možné soudit, že z tohoto hlediska zatěžování obě technologie svařování pro daný materiál jsou vhodné.



Obr. 41 Vzorky tl. 0,25 po tahové zkoušce.

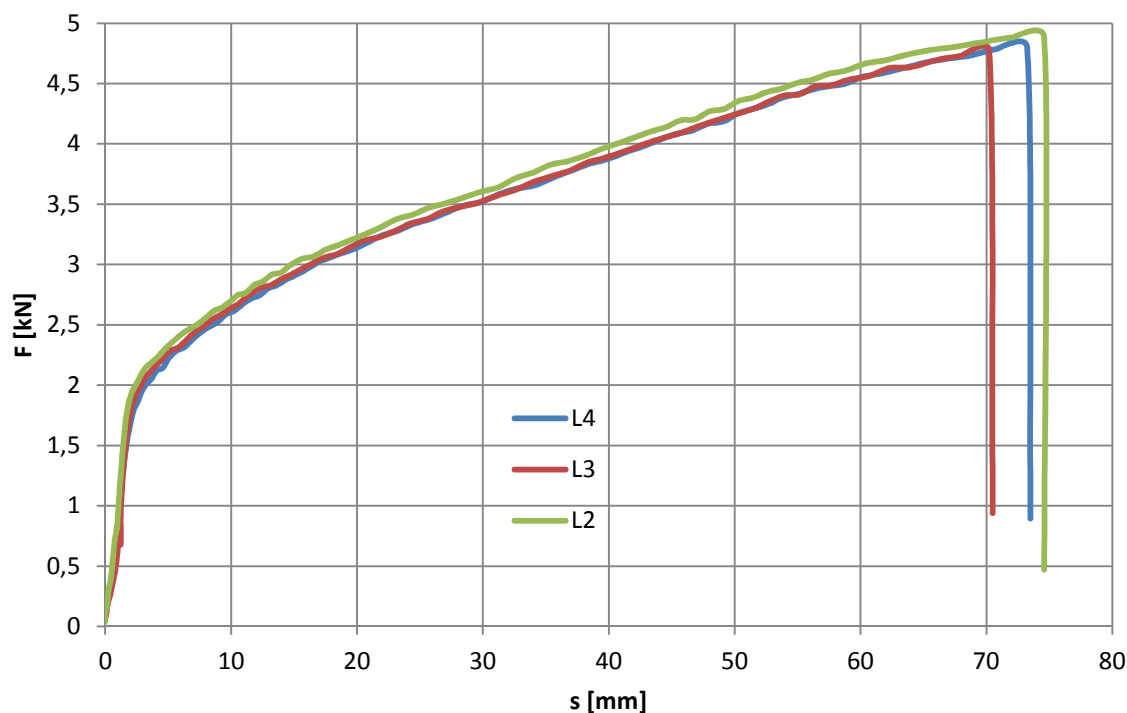
Do programu byla špatně zapsána tloušťka materiálu a některé výsledky bylo nutné přepočítat. Získané a přepočítané hodnoty pro vzorky svařené laserem jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,25 mm svařené laserem.

Vzorek	tl. [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [Mpa]	A [%]
L ₂	0,25	30,60	7,65	4909,20	258,14	641,73	46,25
L ₃	0,25	30,50	7,63	4796,40	257,62	628,62	42,50
L ₄	0,25	30,70	7,68	4824,40	249,80	628,18	48,75
Průměr	-	-	-	-	255,19±3,81	632,84±6,29	45,83±2,57

Vzorky dosahovaly v průměru meze pevnosti okolo 633 MPa a meze kluzu 255 MPa při tažnosti zhruba 46 %.

Při porušení materiálu mimo svar a tepelně ovlivněnou oblast by naměřené hodnoty měly odpovídat mechanickým vlastnostem základního materiálu. Po porovnání s údaji v tabulce 2 opravdu leží v rozmezí stanovených hodnot. Ze získaných hodnot všech měření byl sestrojen diagram zkoušky tahem (obr. 42).



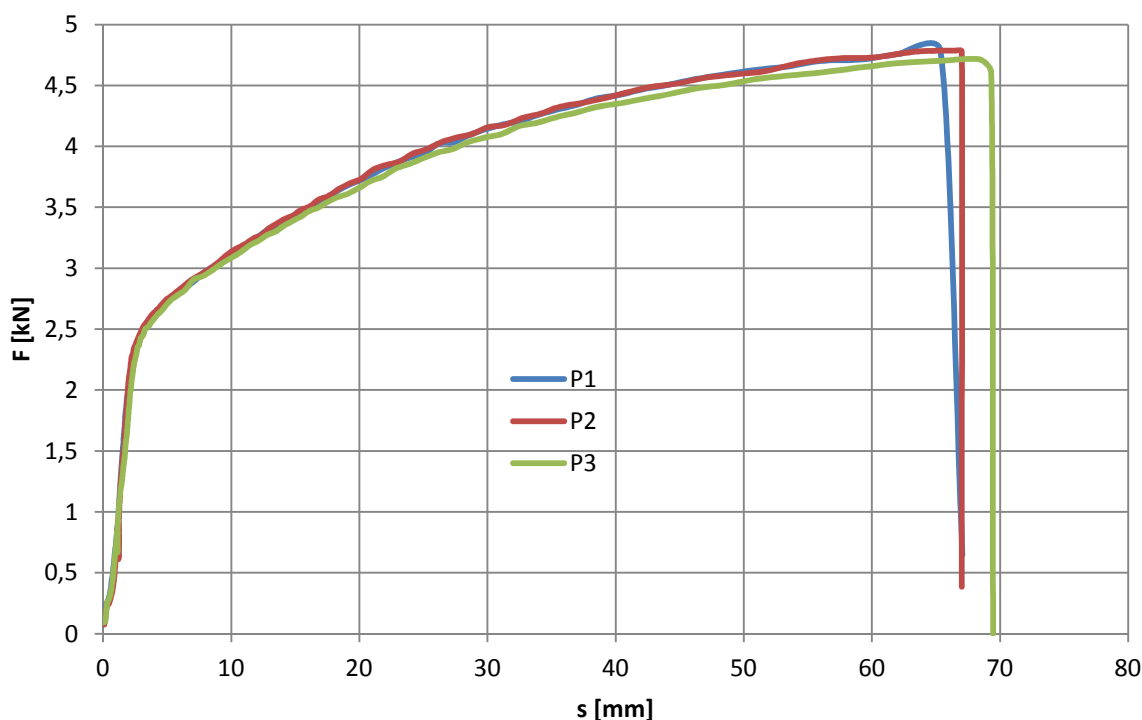
Obr. 42 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,25 svařené laserem.

V tabulce 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro vzorky svařené mikroplazmou. Z průběhu testu vyplývá, že by se hodnoty neměly lišit od hodnot změřených na vzorcích svařených laserem. Mez pevnosti a tažnost vzorků vychází přibližně stejně a liší se od sebe pouze v řádu maximálně jednotek procent. Smluvní mez kluzu se ovšem výrazně liší. Ve srovnání se vzorky svařenými laserem je přibližně o 24 % vyšší. Materiál pro vzorky z mikroplazmy je rozdílný nebo mohou být použité pásy plechu z jiné tavby.

Tab. 8: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,25 mm svařené mikroplazmou

Vzorek	tl. [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [Mpa]	A [%]
P ₁	0,25	30,30	7,58	4805,60	302,69	633,99	40,00
P ₂	0,25	30,30	7,58	4796,40	318,83	632,78	42,50
P ₃	0,25	29,50	7,38	4730,40	328,78	640,98	43,75
Průměr	-	-	-	-	316,77±10,75	635,92±3,61	42,08±1,56

Rozdíl v mezi kluzu je patrný i při porovnání diagramů ze zkoušky tahem. Diagram ze zkoušení vzorků svařených mikroplazmou je na obr. 43. U vzorků označených „L_x“ je zatížené úměrné prodloužení zhruba do 1 800 N oproti vzorkům označených „P_x“, kde toto zatížení dosahuje přibližně hodnoty 2 200 N.



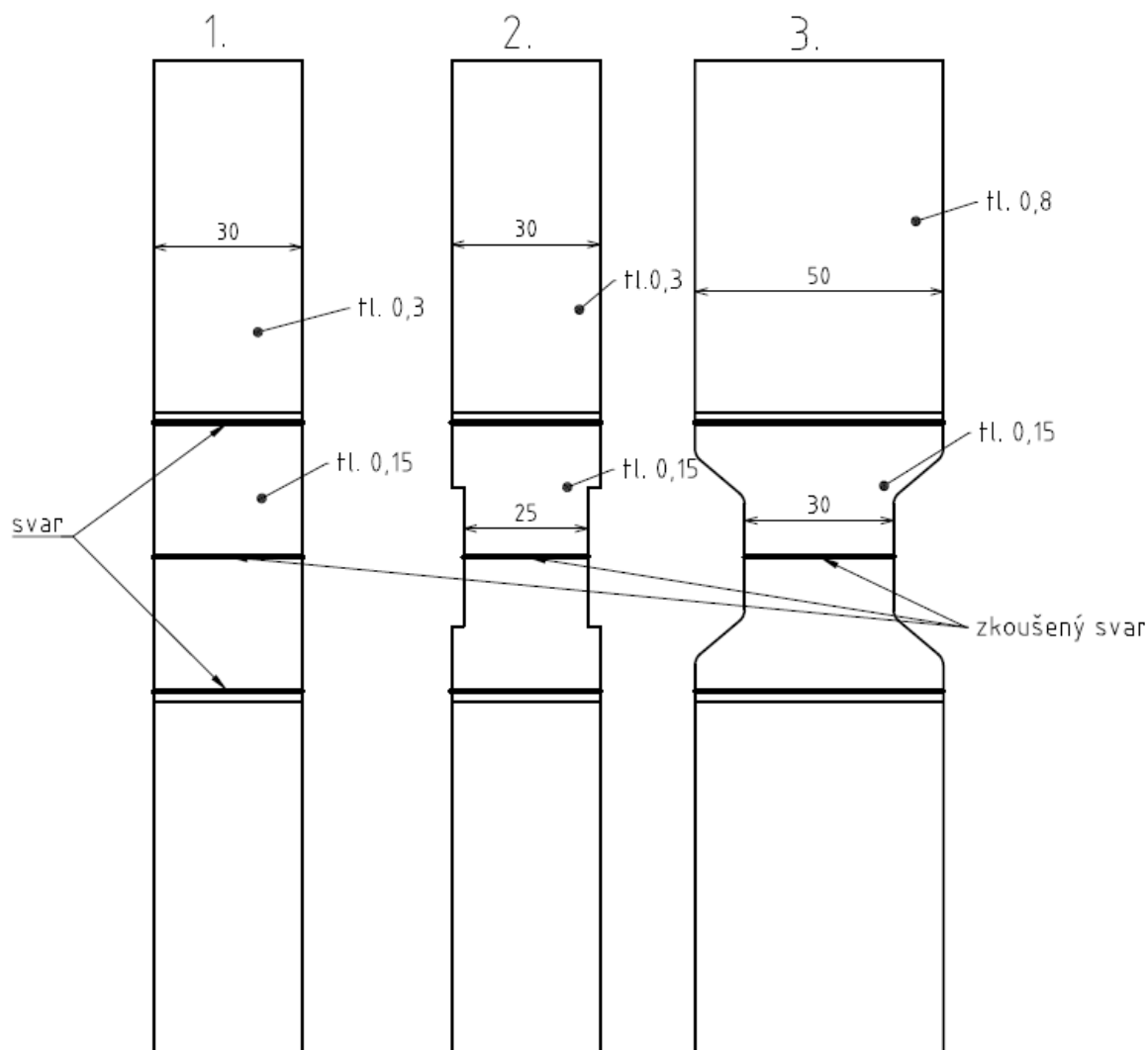
Obr. 43 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,25 svařené mikroplazmou.

3.1.2 Zkouška tahem pro vzorky tloušťky 0,15

Příprava vzorků pro zkoušku tahem u materiálu o tloušťce 0,15 mm byla náročnější. Nastříhané vzorky z dodaných trubek byly dlouhé přibližně 54 mm. Hydraulický zkušební stroj ovšem na takto krátkou vzdálenost neumožňoval přiblížit upínací čelisti, aby byl vzorek ještě upnut za adekvátní vzdálenost. Vzorky musely být upraveny, aby se dala zkouška tahem provést.

U první varianty se na vzorky laserem navařily z každé strany pásky plechu o tloušťce 0,3 mm přeplátovaným spojem a zachovala se šířka vzorku 30 mm. Při zkoušení ovšem docházelo k porušení materiálu podél svaru, který spojoval zkoumaný vzorek s přidaným plechem, a proto se tyto vzorky pro vyhodnocení nedaly použít. Pro zvýšení napětí v místě zkoušeného svaru byly u druhé varianty vypilovány drážky, snížila se plocha průřezu, zvýšilo se napětí a tím došlo k poškození materiálu mimo navařované pásky plechu. Trhliny se ovšem inicializovaly v ostrých přechodových hranách vypilované drážky. Ani podle druhé varianty vzorku nešlo zkoumat svarový spoj.

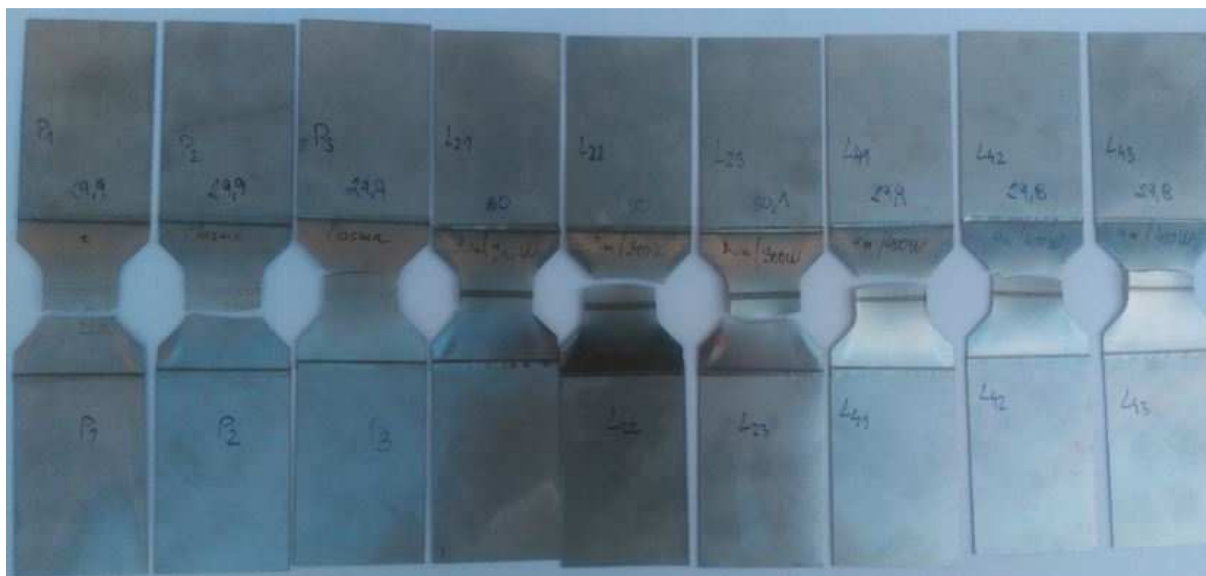
Pro třetí variantu se na vzorku pomocí laseru vyřezal výřez s plynulými přechody, tak aby byl zkoušený svar uprostřed výřezu. V nejužším místě měl vzorek šířku 30 mm a v nejširším 50 mm. Na konce se navařily pásy plechu o tloušťce 0,8 mm, které oproti tenčím plechům usnadňovaly upínání do čelistí zkušebního stroje. Do plechu o tloušťce 0,3 mm se čelisti někdy nezakously a průběh zkoušky byl přerušen, navařením silnějšího plechu se tomuto předešlo. Všechny tři varianty vzorků jsou zobrazeny na obr. 44. Při použití vzorků podle třetí varianty už docházelo k požadovanému porušení materiálu ve zkoumané části.



1 – 1. varianta, 2 – 2. varianta, 3 – 3. varianta

Obr. 44 Vzorky tl. 0,15 pro zkoušku tahem.

Průběh zkoušky probíhal stejně jako při testování vzorků o tloušťce 0,25 mm. Po prvním zkušebním vzorku byla upravena rychlost zatěžování na hodnotu 10 MPa/s. Na obrázku 45 jsou zobrazeny vzorky po provedení zkoušky. Vzorky značené „P_y“ jsou svařované mikrop plazmou, vzorky označené „L_{2y}“ jsou svařené laserem rychlostí 2 m/min a výkonem 300 W a vzorky označené „L_{4y}“ jsou svařené laserem rychlostí 4 m/min a výkonem 400 W.



Obr. 45 Vzorky tl. 0,15 po tahové zkoušce.

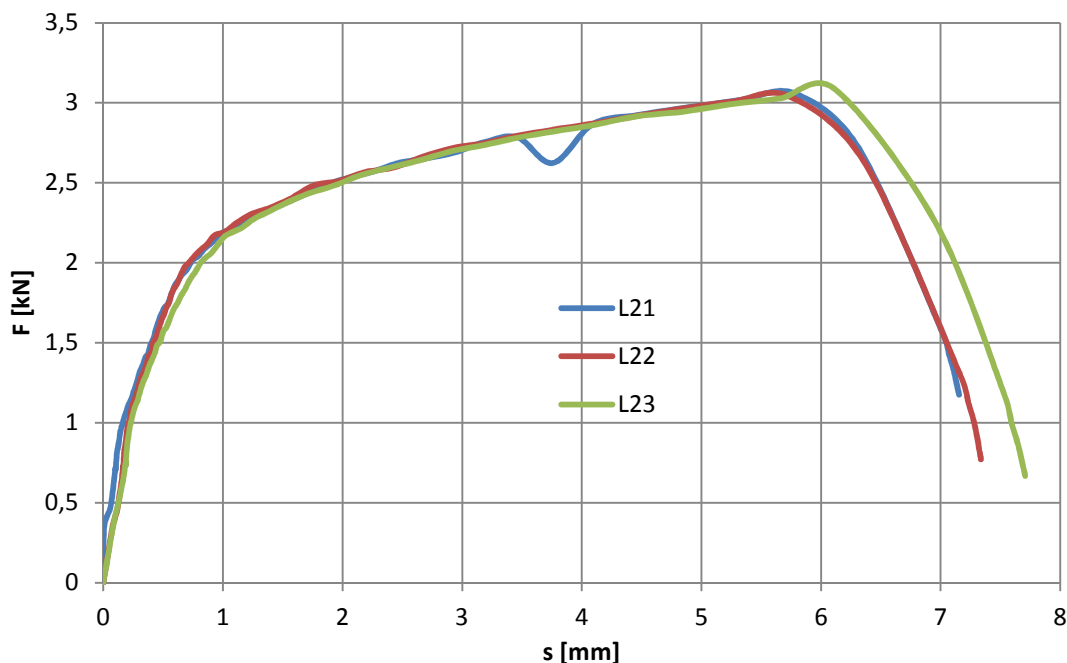
V tabulce 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky o tloušťce 0,15 mm. Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti naměřené ze vzorků svařených laserem jsou skoro stejné a liší se mezi sebou řádově maximálně v rozsahu 2 %. Zatímco materiál svařený mikroplazmou vykazuje opět odlišné hodnoty, mez kluzu je přibližně o 25 % nižší a mez pevnosti o 12 % nižší. Lze opět předpokládat, že firma pro porovnání zaslala odlišné materiály vzorků. I když obě měřené hodnoty pro všechny zkoušené vzorky leží v rozmezí hodnot uvedených v materiálových listech pro materiál 1.4541.

U všech vzorků nastalo porušení mimo oblast svaru a tepelně ovlivněnou oblast. Z toho lze opět usuzovat, že pro dané zatěžování vzorků a pro daný materiál vyhovují obě technologie a při svařování laserem i obě kombinace parametrů.

Tab. 9: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,15 mm.

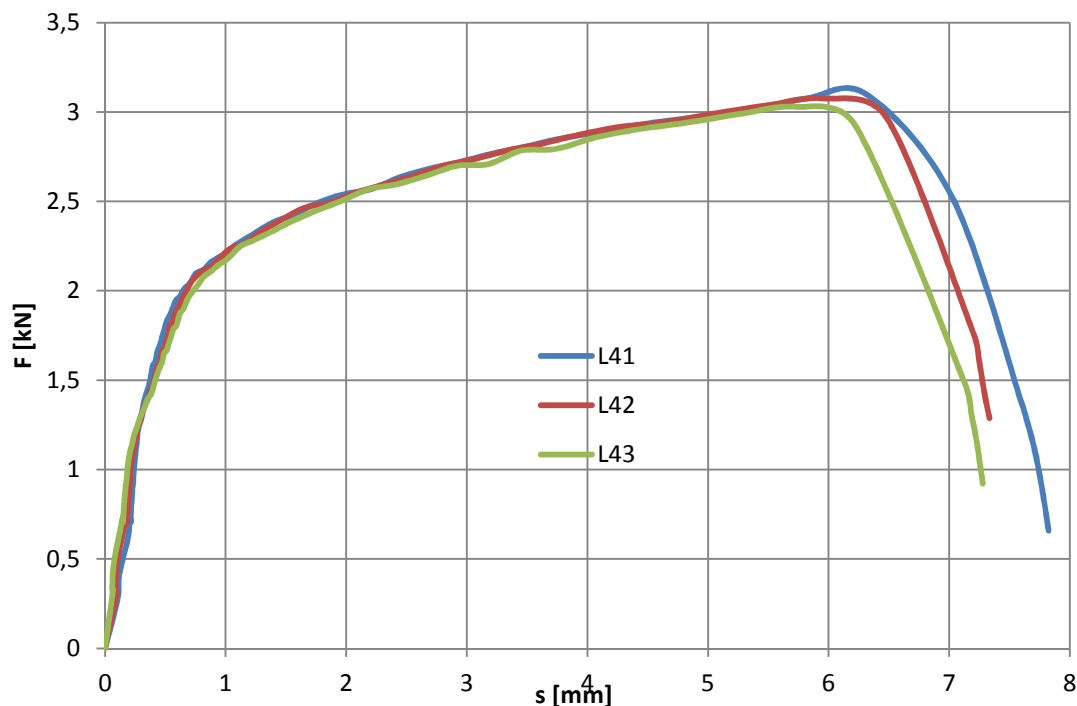
Vzorek	tl. [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [Mpa]
L ₃₂	0,15	30,00	4,50	3075,20	457,69	683,38
L ₂₂	0,15	30,00	4,50	3066,00	466,04	681,33
L ₂₃	0,15	30,10	4,51	3084,80	464,50	683,23
Průměr	-	-	-	3075,33±7,68	462,74±3,63	682,65±0,93
L ₄₁	0,15	29,90	4,49	3112,80	471,79	694,05
L ₄₂	0,15	29,80	4,47	3112,80	479,73	696,38
L ₄₃	0,15	29,80	4,47	3066,00	477,58	685,91
Průměr	-	-	-	3097,20±22,06	476,37±3,53	692,11±4,49
P ₁	0,15	29,90	4,49	2783,60	369,05	620,65
P ₂	0,15	29,90	4,49	2689,60	366,91	599,69
P ₃	0,15	29,90	4,49	2736,80	369,05	610,21
Průměr	-	-	-	2736,67±38,38	368,34±1,01	610,18±8,56

Naměřená data ze všech měření byla upravena v programu Excel. Nejprve bylo nutné očistit data o část, kdy stroj jel na prázdko až do okamžiku napnutí vzorku, a celé křivky se posunuly do nuly. Na obr. 46 je diagram pro vzorky značené „L_{2y}“. U křivky pro vzorek L₂₁ je v horní části patrný výrazný pokles síly, který může být způsoben možným otřesem v místnosti nebo jinými vibracemi ovlivňující měření.



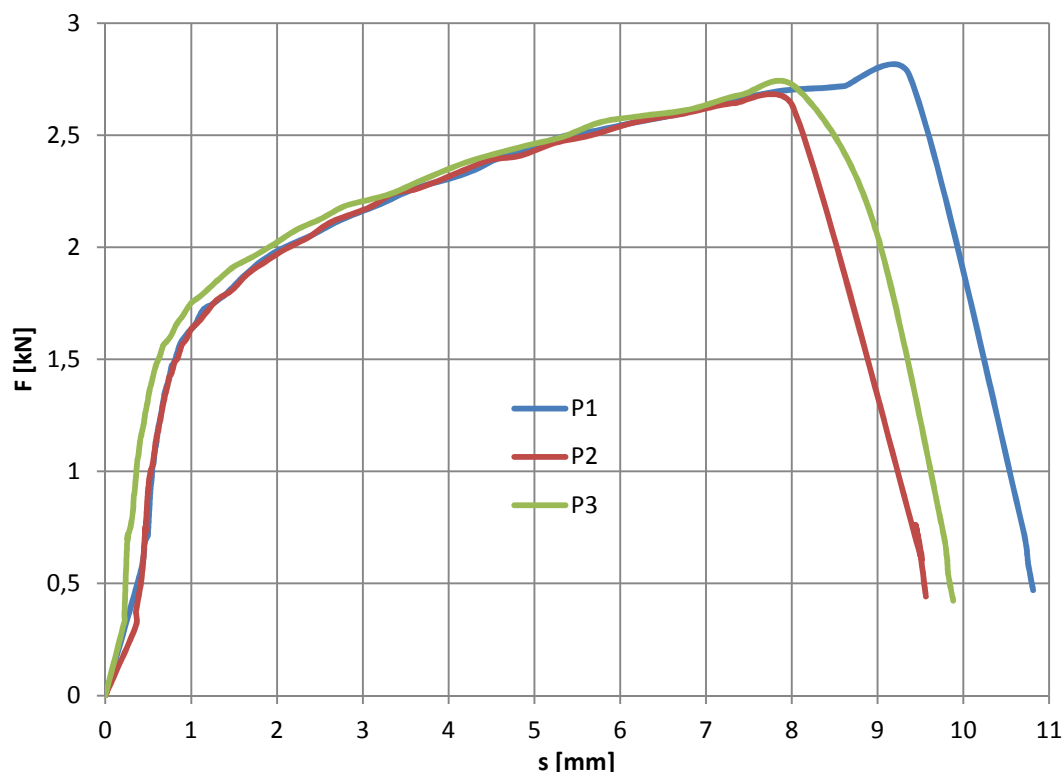
Obr. 46 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené laserem (2 m/min, 300 W).

Na obrázku 47 je diagram zkoušky pro vzorky „L_{4y}“. Z diagramu je patrné, že je téměř shodný s diagramem pro vzorky „L_{2y}“.



Obr. 47 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené laserem (4 m/min, 400 W).

Na posledním diagramu (obr. 48) jsou znázorněny průběhy vzorků „P_y“ svařených mikroplazmou. Z diagramu jde zřetelně vidět, že zatěžující síly se ve svém maximu pohybují pod hranicí 3 000 N oproti vzorkům svařených laserem. Také u meze kluzu je vidět, že je dosažena při menší použité síle.



Obr. 48 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené mikroplazmou.

Přestože se pro vzorky o tloušťce 0,15 mm neměřila tažnost, je z diagramů zřejmé, že materiál vzorků svařovaných mikroplazmou dosahoval vyšších hodnot prodloužení před porušením v porovnání s materiálem vzorků svařovaných laserem.

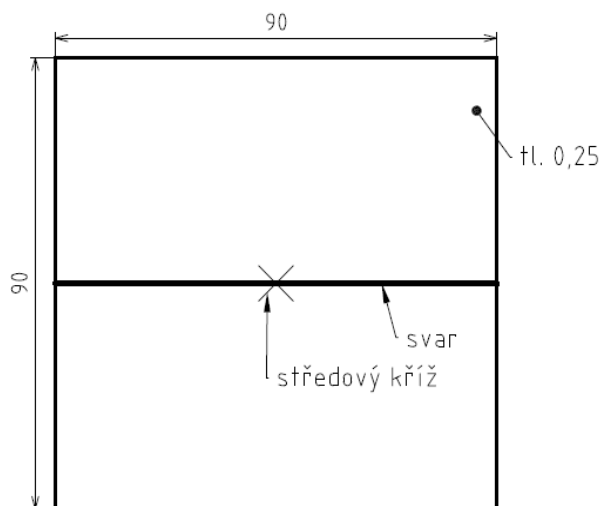
3.2 Hloubení podle Erichsena

Zkouška hloubení se prováděla na zkušebním přístroji znázorněném na obrázku 49. Vpravo je kolo se stupnicí, ze které se po provedené zkoušce odečítala dosažená hodnota prohloubení. Vzorky plechů se vkládaly do místa označeného na obrázku červeným kruhem. Plech byl upnut mezi dosedací plochu a trn, došlo k vynulování stupnice a poté probíhala vlastní zkouška.

Vzorky ke zkoušce se nastříhaly z plechů pomocí pákových nůžek na rozměry 90 x 90 mm se svarem probíhajícím středem vzorku. Pro snadnější ustavení vzorků v přístroji na jejich přesný střed se na vzorek dokreslil středový kříž (obr. 50). Pro každou svařovací technologii se zhotovily 3 vzorky.



Obr. 49 Zkušební přístroj pro zkoušku hloubení podle Erichsena.



Obr. 50 Vzorek pro zkoušku hloubení podle Erichsena.

3.2.1 Zkouška hloubením pro vzorky tloušťky 0,25

V tabulce 10 jsou uvedeny naměřené výsledné hodnoty prohloubení pro každý vzorek. U laserem svařených vzorků bylo v průměru dosaženo prohloubení 14,43 mm a u mikroplazmou svařených vzorků 13,35 mm. Technologií svařování laserem bylo dosaženo přibližně o 8 % většího prohloubení vzorků než u mikroplazmy. Rozdíl v prohloubení ovšem může být způsoben rozdílností vlastností materiálů.

Tab. 10: Naměřené hodnoty ze zkoušky hloubení podle Erichsena pro plechy o tl. 0,25 mm.

Vzorky	Prohloubení [mm]	
	laser	mikroplazma
1	14,80	13,50
2	14,50	13,31
3	14,00	13,24
Průměr	14,43±0,33	13,35±0,11

Pro zkoumaný materiál 14541 se v materiálových listech neuvádí hodnoty prohloubení. Z výsledků lze vyvodit, že rozdíl v prohloubení není markantní a změna technologie svařování nezhorší schopnost prohloubení plechu. Naopak se prohloubení může mírně zvýšit. Na snímcích vzorků po zkoušce (obr. 51) je vidět, že prasklina se v případě obou typů vzorků vyskytovala po vrstevnici vrchlíku (kolmo na svar), což je typické pro hlubokotažné plechy. V případě nevyhovujícího svaru by se prasklina vyskytla ve směru podél svaru. Při této zkoušce obě technologie svařování vyhovují.



Obr. 51 Vzorky tl. 0,25 po zkoušce hloubení podle Erichsena.

3.2.2 Zkouška hloubením pro vzorky tloušťky 0,15

Pro vzorky o tloušťce 0,15 mm byl použit odlišný rozměr vzorků. Z dodaných trubek po rozříznutí zůstaly plechy a šířce přibližně 52 mm. Na pákových nůžkách se pásy plechu nastříhaly na délky 60 mm. Výsledný rozměr vzorků byl 52 x 60 mm. Velikost vzorků značně ztěžovala jejich manipulaci při ustavování v přístroji, neměla však žádný vliv na výslednou hloubku prohloubení. Naměřené hodnoty prohloubení pro tloušťky plechu 0,15 mm jsou uvedeny v tabulce 11.

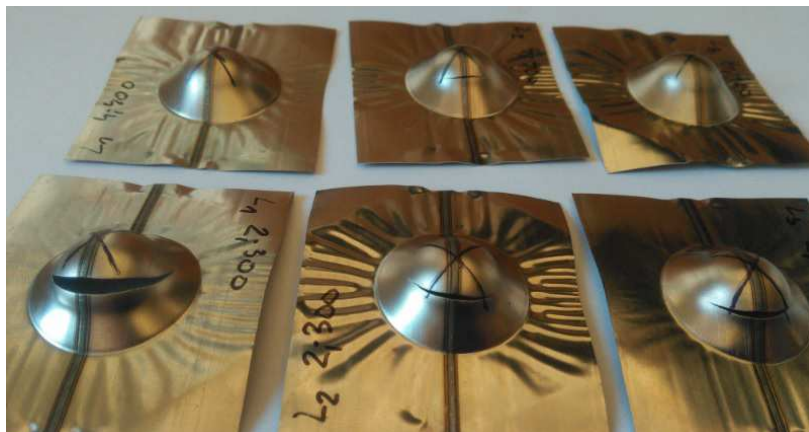
Tab. 11: Naměřené hodnoty ze zkoušky hloubení podle Erichsena pro plechy o tl. 0,15 mm.

Vzorek	Prohloubení [mm]		
	laser 300 / 2	laser 400 / 4	mikroplazma
1	8,24	9,32	13,70
2	9,60	9,00	13,80
3	9,00	10,00	13,60
Průměr	8,95±0,56	9,44±0,42	13,7±0,08

Při hloubení vzorků svařených laserem při výkonu 300 W a rychlosti svařování 2 m/min došlo k porušení materiálu při průměrném prohloubení 8,95 mm. U vzorků svařených laserem o výkonu 400 W a rychlosti svařování 4 m/min bylo dosaženo průměrného prohloubení 9,44 mm, to je o více než 5 % vyšší než při svařování nižším výkonem při poloviční rychlosti. Vzorky svařené mikroplazmou dosahovaly prohloubení v průměru 13,7 mm. Vzorky svařené laserem vykazovaly hodnoty prohloubení o více než 30 % menší ve srovnání se stávající technologií. Takto velký rozdíl v prohloubení je zapříčiněn i odlišným materiálem vzorků svařených mikroplazmou a vzorků svařených laserem. Materiál vzorků svařených mikroplazmou vykazoval vyšší tažnost, a tím pádem dosahuje vyšších hodnot prohloubení.

U všech vzorků svařených laserem docházelo k iniciaci praskliny právě ve svaru. Na rozdíl od u vzorků svařených mikroplazmou prasklina vznikla mimo oblast svaru a poté se šířila dál. Snímky vzorků po provedené zkoušce s prasklinou jsou na obrázku 52. Možnou příčinou

rozdílného místa vzniku prasklin může být anizotropní chování plechu způsobené válcováním nebo změnou struktury během svařování.



a) vzorky svařené laserem



b) vzorky svařené mikroplazmou

Obr. 52 Vzorky tl. 0,15 po zkoušce hloubení podle Erichseny.

3.3 Metalografické šetření

Vzorky pro metalografické šetření byly zality studenou metodou, leštěny a naleptány leptacím roztokem 2-2-1 určeným pro Cr – Ni austenitické oceli. Připravené vzorky pro plech o tloušťce 0,25 mm před zalitím a už zalitý vzorek v přípravku je zobrazen na obrázku 53. Leštění vzorků bylo provedeno na přístroji Tegramin – 20 značky Struers. Makrostruktura i mikrostruktura vzorků byla nafocena konfokálním mikroskopem Olympus LEXT OLS3100 (obr. 54).



a) vzorky před zalitím



b) zalité vzorky

Obr. 53 Příprava vzorků pro metalografii.

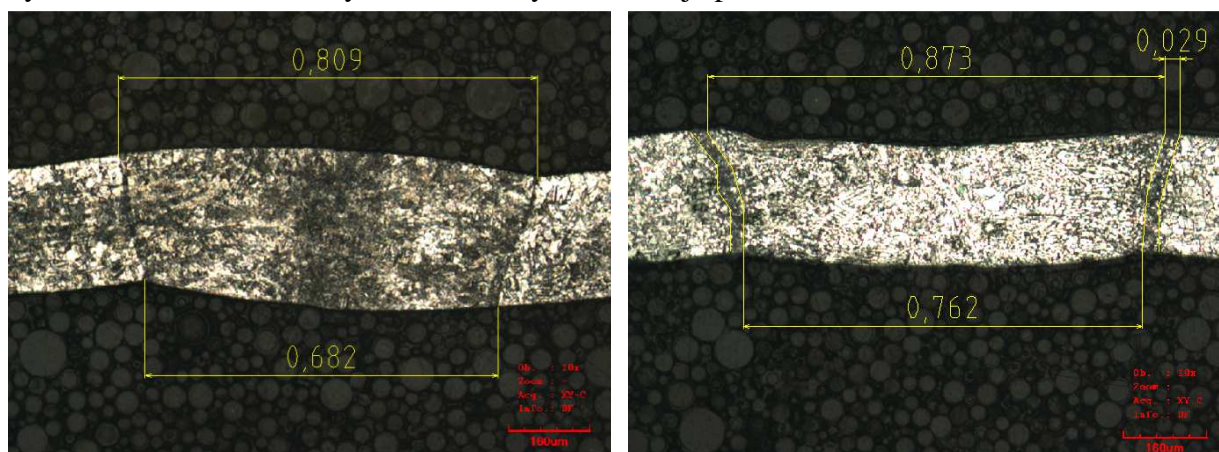


Obr. 54 Konfokální mikroskop Olympus.

3.3.1 Metalografie pro vzorky tloušťky 0,25

Makrostruktura vzorků plechu o tloušťce 0,25 mm je znázorněna na obrázku 55, ve kterém byly pomocí programu AutoCAD 2012 změřeny a zakótovány šířky svaru a případně velikost tepelně ovlivněné oblasti. Z obrázku je patrné, že při mikroplazmovém svařování je svar přibližně o 10 % širší než při laserovém svařování. U laserového svarového spoje je téměř nepatrná tepelně ovlivněná oblast, u svaru provedeném mikroplazmou je zřetelnější a dosahuje hodnoty okolo 0,029 mm. Malá až nepatrná tepelně ovlivněná oblast je způsobena nízkou tepelnou vodivostí austenitické oceli, která je až trojnásobně menší oproti uhlíkovým ocelím. Menší tepelně ovlivněná oblast u laseru oproti mikroplazmě je způsobena několikanásobně vyšší svařovací rychlostí. Materiál je ohříván tak rychle, že se teplo nestihne šířit materiálem.

Svary se významně liší i tvarem. Mikroplazmový svar je mírně propadlý. Na rozdíl od laserového svaru, který je převýšený jak v hlavě tak i v kořeni. K převýšení svaru dochází při tuhnutí svarového kovu. Při chladnutí svaru se plechy smršťují a vlivem sil se snaží přiblížit. V případě, že ve svarovém kovu ještě není všechn kov v tuhé fázi, je při smršťování vytlačován kov a vzniká vyboulení. Převýšení svaru je pozitivum.

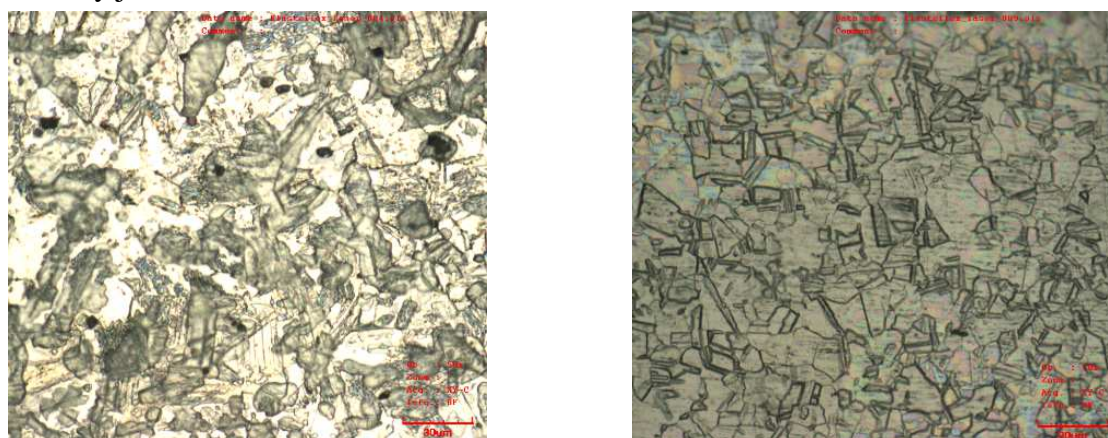


a) laser

b) mikroplazma

Obr. 55 Makrostruktura svaru vzorků tl. 0,25 mm.

Na obrázku 56 je znázorněna mikrostruktura základních materiálů zkoušených vzorků pro tloušťku 0,25 mm. Oba základní materiály mají austenitickou strukturu. Je však patrné, že oba materiály jsou rozdílné.

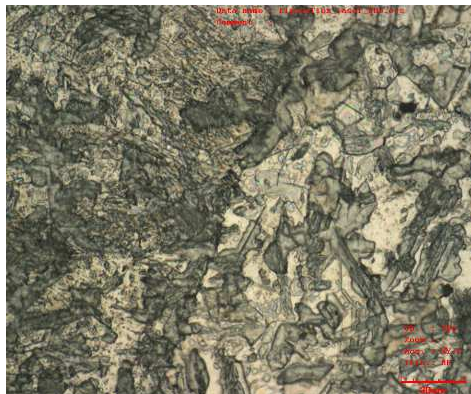


a) laser

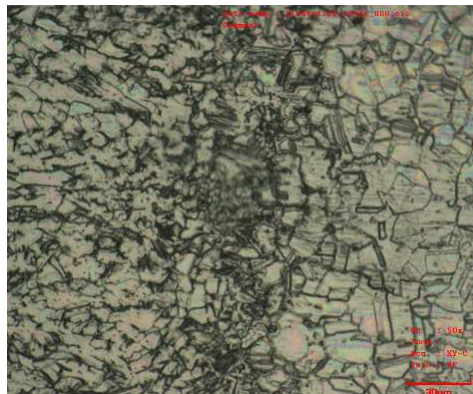
b) mikroplazma

Obr. 56 Mikrostruktura základního materiálu vzorků tl. 0,25 mm.

Na obrázku 57 jsou mikrostruktury vzorků na rozhraní základního materiálu se svarovým kovem pro vzorky o tloušťce 0,25 mm. V pravých částech snímků je základní materiál a v levých svarový kov. Svar má vždy lící strukturu. V obou případech došlo ve svaru ke zjemnění zrna. U laseru je rozdíl ve velikostech zrn markantnější a dochází ke skokové změně ve velikosti zrn na rozhraní se základním materiálem. U mikroplazmy je přechod mezi svarem a základním materiálem oproti laseru plynulejší, což je způsobeno tepelně ovlivněnou oblastí.



a) laser

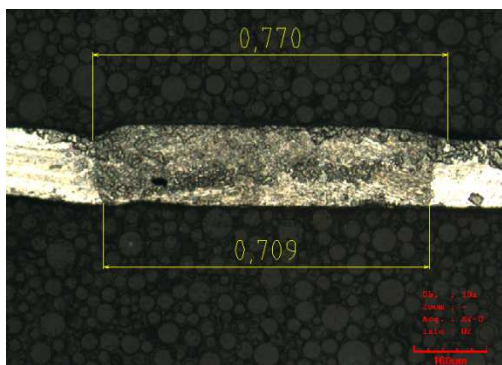


b) mikroplazma

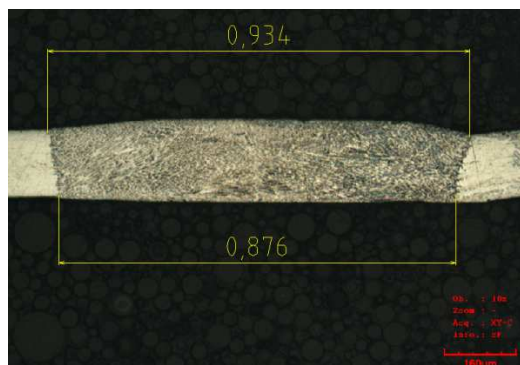
Obr. 57 Mikrostruktura rozhraní základní materiál – svar pro vzorky tl. 0,25 mm.

3.3.2 Metalografie pro vzorky tloušťky 0,15

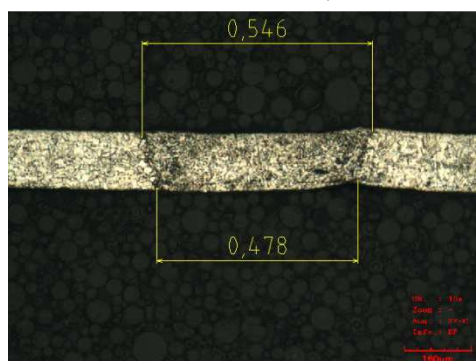
Na obrázku 58 je makrostruktura svaru vzorků z plechu o tloušťce 0,15 mm se zakótovanými šířkami svaru. Ani na jednom vzorku není patrná tepelně ovlivněná oblast, což je způsobeno ze stejného důvodu, nízkou tepelnou vodivostí austenitických ocelí, jako u předešlých vzorků z tlustšího materiálu.



a) svařeno laserem 2 m/min, 300 W,



b) svařeno laserem 4 m/min, 400 W,



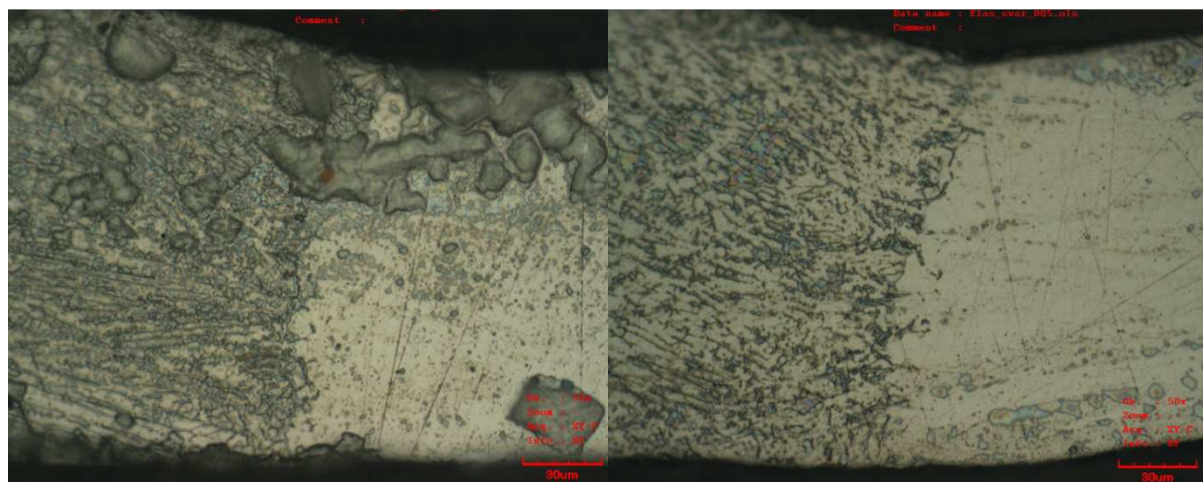
c) svařeno mikroplazmou.

Obr. 58 Makrostruktura svaru vzorků tl. 0,15 mm.

Svar mikroplazmou je mírně propadlý a na makroskopickém snímku je téměř nezatelné rozhraní základního materiálu se svarovým kovem. Vzorky svařené laserem mají rozhraní základního materiálu se svarovým kovem jasně patrné. Svary laserem jsou lehce převýšené, není to ovšem tak markantní jako u vzorku o tl. 0,25 mm. Převýšení je způsobeno ze stejného důvodu jako u vzorku o tl. 0,25 mm. Šířka svaru v hlavě u vzorku svařeného laserem rychlostí 2 m/min a výkonem 300 W je 0,770 mm. Na rozdíl od toho je šířka svaru vzorku svařeného dvojnásobnou rychlostí při výkonu o 100 W větším 0,934 mm, což je o více než 20 % více.

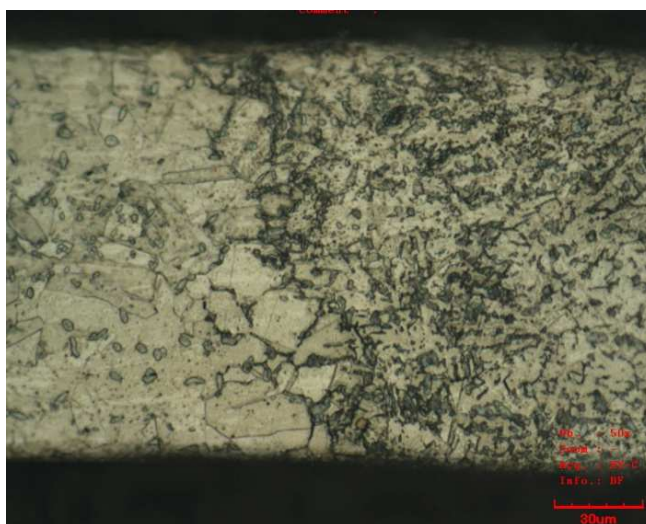
Svar svařený mikroplazmou je zřetelně užší ve srovnání se vzorky svařenými laserem. Šířka svaru je 0,546 mm, to je skoro o 30 % méně než u vzorku svařeného laserem nižším výkonem a o více než 40 % méně než u vzorku svařeného laserem vyšším výkonem.

Na snímcích na obrázku 59 jsou zobrazena rozhraní svarového kovu a základního materiálu, a je zde patrná změna struktury při svařování. Na snímku „a“ a „b“ je vlevo svarový kov a vpravo základní materiál. Skvrny na snímku „a“ jsou způsobeny leptáním a stejně jako u snímku „b“ nejsou rozpoznatelná zrna a struktura materiálu. U snímku „c“ je svarový kov vpravo a je v něm menší zrno než v základním materiálu.



a) svařeno laserem 2 m/min, 300 W,

b) svařeno laserem 4 m/min, 400 W,



c) svařeno mikroplazmou.

Obr. 59 Snímky rozhraní základní materiál - svar pro vzorky o tl. 0,15 mm.

3.4 Struktura materiálu [11]

Odhad struktury materiálu byl určen pomocí Schaefflerova diagramu. Pro určení chromového a niklového ekvivalentu byly použity rovnice (2.4) a (2.5). Dosazované množství prvků do vzorců je převzato z atestů materiálů. Pro výpočet množství δ feritu ve struktuře byl použit vzorec (2.6), do kterého byly dosazeny hodnoty ekvivalentů spočítané pro daný materiál.

Výpočet pro materiál tl. 0,25 mm:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb = 17,2 + 0 + 1,5 \cdot 0,51 + 0 = 17,965 \text{ hm. \%}$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn = 9,2 + 30 \cdot 0,01 + 0,5 \cdot 1,78 = 10,39 \text{ hm. \%}$$

$$\begin{aligned} \% \delta \text{feritu} &= 3 \cdot (Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) = 3 \cdot (17,965 - 0,93 \cdot 10,39 - 6,7) = \\ &= 4,8 \text{ hm. \%} \end{aligned}$$

Výpočet pro materiál tl. 0,15 mm:

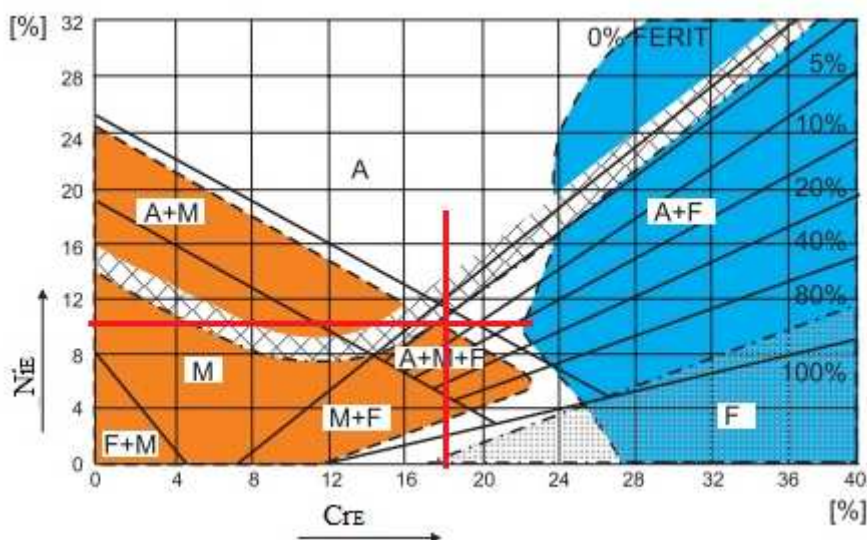
$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb = 17,22 + 0 + 1,5 \cdot 0,38 + 0 = 17,79 \text{ hm. \%}$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn = 9,03 + 30 \cdot 0,04 + 0,5 \cdot 1,1 = 10,78 \text{ hm. \%}$$

$$\begin{aligned} \% \delta \text{feritu} &= 3 \cdot (Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) = 3 \cdot (17,79 - 0,93 \cdot 10,78 - 6,7) = \\ &= 3,2 \text{ hm. \%} \end{aligned}$$

Vypočítané množství podílu δ feritu ve struktuře pro materiál tl. 0,25 mm vyšlo 4,8 hm. % a pro materiál tl. 0,15 mm vyšlo 3,2 hm. %. V obou případech leží v rozmezí doporučených hodnot. Chromový a niklový ekvivalent materiálu byl vynesena do Schaefflerova diagramu a byl zakreslen průsečík hodnot (obr. 60). Pro přehlednost byl zaznamenán jen jeden průsečík s ohledem na to, že pro obě tloušťky vycházely podobné hodnoty a došlo by k překrytí průsečíků.

Průsečík se nachází v oblasti austenitu, martenzitu a feritu. Leží mimo oblast vzniku trhlin pod 400°C i mimo oblast vzniku teplých trhlin nad 1250°C.



Obr. 60 Schaefflerův diagram s vyznačením průsečíků Cr_E a Ni_E [11].

3.5 Skutečný tepelný příkon [25], [31]

Teplo přivedené do spoje ovlivňuje jeho vlastnosti, určuje šířku spoje a dobu ochlazování. Změnou procesních parametrů lze vnesené teplo měnit. Množství tepla přivedeného do svarového spoje (skutečný tepelný příkon) na jednotku délky se vypočítá podle vztahu (3.1) převzatého z literatury [25].

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} = \eta \cdot \frac{P}{10^3 \cdot v} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (3.1)$$

kde: η - součinitel účinnosti [-],
 U - svařovací napětí [V],
 I - svařovací proud [A],
 v - svařovací rychlost [mm/s],
 P - svařovací výkon [W].

K optimalizaci procesních parametrů při svařování laserem byl spočítán skutečný tepelný příkon pro všechny tři parametry. Spočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12: Skutečný tepelný příkon pro vzorky svařené laserem.

Vzorky	tl. 0,25 mm, 1 000 W, 15 m/min	tl. 0,15 mm, 300 W, 2 m/min	tl. 0,15 mm, 400 W, 4 m/min
Q [J/mm]	2,0	4,5	3,0

Do výpočtu byl použit součinitel účinnosti $\eta = 0,5$ pro svařování pevnolátkovým laserem uváděný v literatuře [31]. Vzorový výpočet pro tabulku 12 s koeficientem 1000/60 pro převod jednotek z m/min na mm/s:

$$Q = \eta \cdot \frac{P}{10^3 \cdot v} = 0,5 \cdot \frac{1000}{10^3 \cdot 15 \cdot \frac{1000}{60}} = 0,002 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} = 2 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Nejnižší skutečný tepelný příkon byl při svařování vzorků o tloušťce 0,25 mm a nejvyšší při svařování vzorků tloušťky 0,15 mm výkonem 300 W. Při srovnání vypočítaných hodnot a získaných hodnot z předešlých zkoušek pro vzorky o tloušťce 0,15 mm plyne, že lepších hodnot prohloubení dosahují vzorky s nižším skutečným tepelným příkonem. U plechu tloušťky 0,25 mm byl dokonce použitý nižší tepelný příkon než pro slabší materiál a bylo dosaženo lepšího prohloubení než při současném svařování mikroplazmou.

4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY

Při použití laseru pro svařovací operace tenkých austenitických korozivzdorných ocelí bylo dosaženo několikanásobně vyšší rychlosti. Laserová zařízení jsou proti klasickým svařovacím zařízením dražší, a proto je jejich pořízení nutné zvážit.

Důležitý faktor u ekonomického zhodnocení je cena za svaření 1 metru materiálu. Vzhledem k tomu, že firma neposkytla přesné interní údaje o nákladech a cenách, jsou uváděné ceny, náklady a pracovní vytížení strojů pouze orientační. Výpočty zahrnují ceny, které jsou pro obě metody významně rozdílné, tj. cena strojů, náklady na plyny a spotřební díly. Do výpočtů nejsou započítány další náklady, jako například energie, mzda operátora, režie, servis a údržba.

Uvažovaná cena za laserové svařovací zařízení je 8 000 000 Kč a za zařízení pro mikroplazmové svařování je cena 500 000 Kč. Při kalkulaci je počítáno s dobou odpisu 5 let, kdy za roky 2016 – 2020 je 1255 pracovních dnů při jednosměnném provozu s denní pracovní dobou 8 hodin. U laseru je započítaná spotřeba argonu čistoty 4.6 15 l/min a u plazmy je dle WPS zahrnut argon vyšší čistoty 4.8 se spotřebou 7,5 + 1,5 l/min. Počítá se s cenou láhve argonu 1600 Kč a u láhve s čistotou 4.8 s cenou 2200 Kč, kdy je v láhvi 10 000 litrů plynu. Odhad nákladů na spotřební díly je u plazmy 20 000 Kč za rok, tyto náklady nám u laseru odpadají. Spočítané ceny za 1 metr svaru pro dané parametry jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab. 13: Cena 1 metru svaru při svařování laserem a mikroplazmou.

	Mikroplazma		Laser		
Cena zařízení [Kč]	500 000		8 000 000		
Pracovních dnů [den]	1 255				
Pracovních hodin [hod]	10 040				
Spotřeba Ar 4.6 [l/min]	-		15		
Spotřeba Ar 4.8 [l/min]	9		-		
Cena Ar 4.6 za hodinu provozu [Kč]	-		144		
Cena Ar 4.8 za hodinu provozu [Kč]	120		-		
Náklady na spotřební díly za rok [Kč]	20 000		-		
Hodinová sazba [Kč]	180		941		
Rychlost svařování [m/min]	1,5	-	15	4	2
Cena za metr [Kč]	2,00	-	1,10	4,00	7,90

Z výsledků uvedených v tabulce 13 vyplývá, že při svařování laserem s rostoucí rychlostí klesá cena za 1 metr svaru. Přestože jsou vstupní data pouze orientační, je z výsledku patrné, že laser je vhodný pro zvýšení produktivity výroby. Kvůli vysokým vstupním nákladům je laser využitelný hlavně pro velkosériovou výrobu, která zaručí jeho plné vytížení.

ZÁVĚRY

Pro zvýšení produktivity výroby kovových vlnovcových trubek byl stávající proces svařování trubek pomocí mikroplazmy nahrazen laserovým zařízením. Při svařování laserem bylo dosaženo několikanásobně vyšší rychlosti svařování oproti mikroplazmě. Testovala se kvalita svaru vzorků svařených stávající technologií a vzorků svařených laserem pro materiál z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541.

Firma dodala trubky tloušťky 0,25 mm svažené mikroplazmou při rychlosti svařování 1,5 m/min a laserem při výkonu 1000 W a rychlosti svařování 15 m/min. Dále trubky tloušťky 0,15 mm svažené mikroplazmou a dvě trubky s rozdílnými parametry svařování laserem, první při výkonu 300 W a rychlosti svařování 2 m/min a druhou svaženou výkonem 400 W rychlostí 4 m/min. Pro vzorky byly navrženy experimenty testování kvality svaru.

Při tahové zkoušce došlo u všech zkoušených vzorků k porušení materiálu mimo oblast svaru a tepelně ovlivněnou oblast a z tohoto hlediska zatěžování obě metody pro obě tloušťky materiálu a všechny parametry vyhovují. Nicméně u vzorků tloušťky 0,25 mm vykazoval materiál svažený mikroplazmou mez kluzu o 24 % vyšší než materiál použitý pro vzorky svažené laserem. U vzorků tloušťky 0,15 mm byly dosažené hodnoty pro vzorky svažené laserem podobné, ale opět materiál použitý pro vzorky svažené mikroplazmou vykazoval mez kluzu nižší o přibližně 25 %. Z toho lze vyvozovat, že byly dodány rozdílné materiály nebo byly použity pásy plechu z jiné tavby.

U hloubení podle Erichsena vzorky tloušťky 0,25 mm svažené mikroplazmou dosahovaly průměrné hodnoty prohloubení 13,35 mm a vzorky svažené laserem 14,43 mm, což je o 8 % více. Rozdíl může být způsoben odlišnými mechanickými vlastnostmi materiálu, avšak i přesto lze usuzovat, že při zvolených svařovacích parametrech nedojde k výraznému zhoršení prohloubení plechu ve srovnání se stávající technologií. Prasklina se pro oba typy vzorku vyskytovala po vrstevnici vrchlíku a vznikala mimo oblast svaru v základním materiálu.

Dle výpočtů dosahovaly lepšího prohloubení vzorky s nižším tepelným příkonem. Pro vzorky tloušťky 0,25 mm svažené laserem byl použit tepelný příkon 2 J/mm a vzorky dosahovaly prohloubení srovnatelného se stávající metodou. Proti tomu vzorky tloušťky 0,15 mm měly nejhorší prohloubení (v průměru 8,95 mm) při svařovacím výkonu 300 W s tepelným příkonem 4,5 J/mm. Lepšího prohloubení (v průměru 9,44 mm, tj. o 5 % více) dosáhly tyto vzorky svažené výkonem 400 W s tepelným příkonem 3 J/mm. Vzorky svažené mikroplazmou dosahovaly průměrného prohloubení 13,7 mm, což je ve srovnání se vzorky svaženými laserem o přibližně 30 % více. U všech vzorků tloušťky 0,15 mm svařených laserem docházelo k iniciaci praskliny ve svaru.

Pro svařování plechu tloušťky 0,15 mm bych doporučoval snížit výkon při stejné rychlosti svařování nebo zvýšit rychlost a ponechat svařovací výkon pro dosažení lepších mechanických vlastností. Z ekonomického hlediska je lepší ponechat výkon a zvýšit rychlost svařování, neboť cena za 1 metr svaru se úměrně snižuje se zvyšující rychlostí svařování. U laserového svařování je při rychlosti 2 m/min cena za 1 metr svaru 7,90 Kč, při rychlosti 4 m/min je cena 4,00 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. Adlingtons [online]. ©2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: http://www.adlingtons.com.au/Pipe_and_tube_welding_manual_robotic.html
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
3. Bellows & Expansion Joints. *General Industrial Corporation* [online]. ©2002 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.geeic.com/bllows.html>
4. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
5. BETKA, Jan, František PIRK, Ivo SKÁLA a Jiří SKÁLA. *Principy CO 2 laseru a jeho využití v chirurgii*. 1. vyd. Praha: Avicenum, 1990, 95 s. Novinky v medicíně (Avicenum). ISBN 80-201-0096-2.
6. Candle power Forums [online]. ©2016 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?142859-argon-ion-laser>
7. CITACE PRO [online]. 2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/dokument/YB83nnYMuTQu9Isk>
8. ČÍP, T. Svařování vysokopevnostních ocelí laserem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 107 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
9. ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*.
10. DULEY, Walter W. *Laser welding*. 1. vydání. Kanada: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-24679-4.
11. HAJDÍK, Jiří a Michal HEINRICH. Svařování vysokolegovaných ocelí: 1. část. In: *Svět svaru* [online]. Ostrava: Český svářečský ústav [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.vysoce.leg1_2007.pdf
12. HAVRILLA, David a BROCKMANN. Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, (11) [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html>
13. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. DUSÍK, Jiří. *MegaBlok* [online]. 2013 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
14. HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-718-3262-6.
15. http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch08.htm. NAVRÁTIL, Leoš a Hana KOLÁŘOVÁ. *EAMOS* [online]. ©2002-2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch08.htm
16. HUBERT, Michael. Obrábění laserem pro všechna odvětví. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, (1) [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-laserem-pro-vsechna-odvetvi.html>
17. Industrial Bellows. *Indiamart* [online]. ©1996-2016 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/shivam-cast-products/industrial-bellows.html>
18. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2): svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (4) [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>

19. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (5): Laserové řezání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (10) [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
20. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 1. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010, [42] s. ISBN 978-80-87240-65-6.
21. Laserové kalení. *MATEX PM* [online]. ©2011 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/laserove-kaleni>
22. Laserové navařování. *LaserTherm* [online]. 2016 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani/>
23. MANN, Kurt a Rüdiger BROCKMANN. Laserové skenerové svařování dveří nového Audi A4. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, (4) [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-skenerove-svarovani-dveri-noveho-audi-a4.html>
24. MARTAN, Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj? *Automobil Industry* [online]. 2015, (3) [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>
25. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771853.
26. METAL EXPANSION JOINTS. *GLOBAL TRANSMISSION* [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.globaltransmission.co.in/metal-expansion-joints-959910.html>
27. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1): princip laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (3) [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
28. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (9) [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
29. NOVÁK, Miroslav. Remote welding: svařovací metoda s vysokou produktivitou. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, (3) [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/remote-welding-svarovaci-metoda-s-vysokou-produktivitou.html>
30. NOVÁK, Miroslav. SERIÁL NA TÉMA LASERY: HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *LAO* [online]. 2011, (15.3.) [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
31. OCHODEK, Vladislav. Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I. *VŠB TU Ostrava: Katedra mechanické technologie - ústav svařování* [online]. 2011, **2011**(1), 42 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_templ_rezimu_a1.pdf
32. *Omega Thermo Products* [online]. ©2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.omegathermoproducts.com/>
33. PETERKA, Pavel, Pavel HONZÁTKO, Ivo KAŠÍK a Adéla MICHKOVÁ. Vláknové lasery. *Věda kolem nás* [online]. 2013, (11710) [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: http://www.vedakolemna.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.4956516915733742
34. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
35. RÜTERING, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, (9) [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>

36. ŘASA, Jaroslav. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, (7) [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
37. Řezání laserem. *HS-TECH* [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.hs-tech.cz/rezani-laserem>
38. *Senior Aerospace Ketema* [online]. ©2013 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://saketema.com/capabilities/#mg>
39. SCHUBERT, Steffan. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, (7) [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
40. SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLA VATÝ. *Svařování plazmovým obloukem* [online]. 2014 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1_SvarovaniPlasmou.pdf
41. SCHWARZ, Drahomír. *Plazmové, elektronové a laserové svařování* [online]. 2010 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1%20Plazma-laser-elektronov%C3%A9.pdf>
42. Skenerové svařování: vysoce produktivní obrábění bez prostojů. *TRUMPF* [online]. ©2016 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/skenerove-svarovani.html>
43. *SKODOCK Gruppe* [online]. 2009 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.skodock-elasteflex.com/cs/>
44. ŠEBESTOVÁ, Hana. Hybridní metody svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_hybridni_svarovani.pdf
45. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. 2014 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
46. Technical information: Laser processing: CO2 laser. *TRUMPF* [online]. 2007 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
47. The Technology behind Edge Welded Metal Bellows. *Coupling Tips* [online]. 2012 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.couplingtips.com/bellows-couplings/the-technology-behind-edge-welded-metal-bellows/>
48. *Ústav strojírenské technologie: Odbor technologie tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/>
49. *Witzenmann Opava* [online]. ©WITZENMANN [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.witzenmann.cz/cs/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
b	šířka	[mm]
Cr _E	chromový ekvivalent	[hm. %]
d	průměr fokusovaného paprsku	[mm]
E	modul pružnosti	[GPa]
E _i	energie pulzu	[J]
El.	elektrický	[-]
E _r	energetický rozdíl mezi hladinami	[J]
F _m	největší zatěžující síla	[N]
G	gravírování	[-]
h	Planckova konstanta	[J·s]
I	svařovací proud	[A]
IE	prohloubení	[mm]
K	kalení	[-]
L	vzdálenost zrcadel	[mm]
LD	laserové diody	[-]
M	mikro obrábění	[-]
n	přirozené číslo	[-]
N	nanášení vrstev	[-]
Ni _E	niklový ekvivalent	[hm. %]
nk.	nekovů	[-]
P	výkon laserového paprsku	[W]
P _{max}	maximální výkon pulzu	[W]
Q	skutečný tepelný příkon	[kJ·mm ⁻¹]
R _e	mez kluzu	[MPa]
RF	radio frekvenční	[-]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
Ř	řezání	[-]
S	svařování	[-]
s	vzdálenost ohniska od povrchu materiálu	[mm]
S ₀	plocha průřezu	[mm ²]
tl.	tloušťka	[mm]
U	svařovací napětí	[V]
V	vrtání	[-]
v	rychlost svařování	[mm/s]
v _f	frekvence vyzářeného fotonu	[s ⁻¹]
Z	kontrakce	[%]
Zn	značení	[-]
λ	vlnová délka záření	[mm]
η	součinitel účinnosti	[-]
τ	délka pulzu	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady kovových vlnovců [3], [47], [26], [17].....	9
Obr. 2 Kovový vlnovec před a po vytvoření vln.....	10
Obr. 3 Průběh svařování svazkem elektronů [38].	11
Obr. 4 Svařování trubky metodou WIG s přídavným materiálem [1].	11
Obr. 5 Příklad svařování laserem [32].	12
Obr. 6 Plazmový hořák [2].	14
Obr. 7 Schéma interakce fotonu s atomem [20].	15
Obr. 8 Schéma optického rezonátoru [20].	15
Obr. 9 Princip vzniku laserového záření [27].	16
Obr. 10 Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru [19].	16
Obr. 11 Ukázka módů [6].	17
Obr. 12 Schéma plynového laseru s podélným prouděním [2].	18
Obr. 13 Schéma plynového laseru s příčným prouděním [4].	19
Obr. 14 Schéma deskového CO2 laseru [30].	19
Obr. 15 Pevnolátkové lasery [28].	20
Obr. 16 Schéma Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [30].	21
Obr. 17 Schéma diskového laseru [24].	21
Obr. 18 Schéma aktivního prostředí vláknového laser [24].	22
Obr. 19 Schéma vláknového laseru [13].	22
Obr. 20 Schéma laserové diody [13].	23
Obr. 21 Konstrukce polovodičového laseru [36].	23
Obr. 22 Řezání laserem [37].	25
Obr. 23 Navařování laserem [22].	25
Obr. 24 Laserem kalený ozubený hřeben [22].	25
Obr. 25 Absorpce záření v kovech [19].	26
Obr. 26 Mechanismy laserového svařování [18].	27
Obr. 27 Průběh výkonu laseru při kontinuálním režimu [46].	28
Obr. 28 Průběh výkonu laseru při pulzním režimu [4].	28
Obr. 29 Schéma hybridního svařování [16].	29
Obr. 30 Hybridní svařovací hlava [16].	29
Obr. 31 Skenerová hlava [29].	30
Obr. 32 Princip skeneru [42].	30
Obr. 33 Svarové vady, které mohou nastat při svařování laserem [46].	31
Obr. 34 Zkouška hloubení podle Erichsena [14].	32
Obr. 35 Schaefflerův diagram [11].	33
Obr. 36 Svařovací linka laseru.	34
Obr. 37 Detail přípravku pro svařování laserem.	35
Obr. 38 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/ [48].	36
Obr. 39 Řídící jednotka EDC 60 [48].	36

Obr. 40 Vzorek tl. 0,25 pro tahovou zkoušku.	37
Obr. 41 Vzorky tl. 0,25 po tahové zkoušce.	37
Obr. 42 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,25 svařené laserem.	38
Obr. 44 Vzorky tl. 0,15 pro zkoušku tahem.	40
Obr. 45 Vzorky tl. 0,15 po tahové zkoušce.	41
Obr. 46 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené laserem (2 m/min, 300 W).	42
Obr. 47 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené laserem (4 m/min, 400 W).	42
Obr. 48 Diagram zkoušky tahem pro vzorky tl. 0,15 svařené mikroplazmou.	43
Obr. 49 Zkušební přístroj pro zkoušku hloubení podle Erichsena.	44
Obr. 50 Vzorek pro zkoušku hloubení podle Erichsena.	44
Obr. 52 Vzorky tl. 0,15 po zkoušce hloubení podle Erichsena.	46
Obr. 53 Příprava vzorků pro metalografii.	46
Obr. 54 Konfokální mikroskop Olympus.	46
Obr. 55 Makrostruktura svaru vzorků tl. 0,25 mm.	47
Obr. 56 Mikrostruktura základního materiálu vzorků tl. 0,25 mm.	47
Obr. 57 Mikrostruktura rozhraní základní materiál – svar pro vzorky tl. 0,25 mm.	48
Obr. 58 Makrostruktura svaru vzorků tl. 0,15 mm.	48
Obr. 59 Snímky rozhraní základní materiál - svar pro vzorky o tl. 0,15 mm.	49
Obr. 60 Schaefflerův diagram s vyznačením průsečíků Cr _E a Ni _E [11].	50

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.4541 [43].	10
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 [43].	11
Tab. 3: Základní princip průmyslových laserů [30].	24
Tab. 4: Srovnání metod svařování [8].	26
Tab. 5: Svařovací parametry pro svařování mikroplazmu [43].	35
Tab. 6: Svařovací parametry pro svařování laserem [43].	35
Tab. 7: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,25 mm svařené laserem.	38
Tab. 8: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,25 mm svařené mikroplazmou.	39
Tab. 9: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky tl. 0,15 mm.	41
Tab. 10: Naměřené hodnoty ze zkoušky hloubení podle Erichsena pro plechy o tl. 0,25 mm.	44
Tab. 11: Naměřené hodnoty ze zkoušky hloubení podle Erichsena pro plechy o tl. 0,15 mm.	45
Tab. 12: Skutečný tepelný příkon pro vzorky svařené laserem.	51
Tab. 13: Cena 1 metru svaru při svařování laserem a mikroplazmou.	52

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Atest materiálu 1.4541 tl. 0,25 mm

Příloha č. 2 Atest materiálu 1.4541 tl. 0,15 mm

Příloha č. 3 WPS pro vzorky tl. 0,25 mm svařené mikroplazmou

Arinox S.p.A.
Sede legale
26010 Robecco d'Oglio (CR) - Italia
S.S. 454bis

Sede Amm. e Stabilimento
16039 Sestri Levante (GE) - Italia
Via Gramsci, 41/A
Tel. +39 0185 3661
Fax +39 0185 366 320

e-mail: sales@arinox.arvedi.it
www.arvedi.it

Cap.Soc. 7.900.000,00 EUR i.v.
Società interamente controllata
da Iltis Inox S.p.A.

R.L. CR 03088610102
Mecc. Est. CR 011871
C.F. 03088610102
Part.IVA IT. 00203820998
REA 158333

Arinox

Quality Management System certified by
TÜV Italia
according to UNI EN ISO 9001:2008



13.10.2014

Test Certificate - Certificato di collaudo - Abnahmeprüfzeugnis

(In accordance with EN 10204 Test certificate 3.1)
(Secondo EN 10204 - Certificato di collaudo 3.1)
(gemäß EN10204 Bescheinigung der Werkstoffprüfung 3.1)

CUSTOMER CLIENTE BESTELLER	Skodack GmbH Heinrich-Northoff-Ring 2 D-30826 GARSEN	TEST NR. NR. COLLAUDO PRUF NR.	2014/ 85532/ 10/1 PL.Nr.121051223/010
PRODUCT PRODOTTO NOMENCLATURA	COILS ROLOI DI ACCIAIO INossidabile BANDEN AUS NICHTROSTMETALL STAHL	FINISH FINITURA AUFBEREITUNG	2R - BA
SPECIFICATION IN ACCORDANCE WITH SPECIFICA SECONDO ANFORDERUNG	TUV AD-W2, AD 2000-W2, AD W10	OTHER SPECIFICATIONS ALTRE SPECIFICHE WEITERE LIEFERVORSCHRIFTEN	ELONG
CUSTOMER ORDER ORDINE CLIENTE BESTELLUNG	200-BA00003943	OUR CONF. ORDER NO CONF. ORDER UNSERE BESTÄTIGUNG	1110/85532/00000
		NUMBER / NR. WERTSTOFF / ADR	1.4541/321

ANALISI/ANALYSIS/ANALYSE

NR. ROTOLO/COIL, N.BAND NR.	NR. COLLAUDO/HEAT INSMELZE NR.	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Ti	%Nb	%N	%Cu
J990S	843347IL	0.010	1.780	0.510	0.001	0.002	17.200	9.200		0.170		0.010	
J7L6X2S	425011	0.042	1.100	0.470	0.028	0.001	17.160	9.000		0.371		0.010	

1. MATERIALE E RESISTENTE AL TEST DI CORROSIONE INTERMEDIANE IN ACCORDO ALLE NORME DIN EN 2591-2 E ASTM A362 p.1
THE MATERIAL IS RESISTANT TO INTERMEDIATE CORROSION IN ACCORDANCE WITH DIN EN 2591-2 AND ASTM A362 p.1
DIE GEBENGEWÄRTIGE SCHWELZE IST BESTÄNDIG GEGEN INTERMEDIATE KORROSION GEMÄß DIN EN 2591-2 UND ASTM A362 p.1

ESISTE CORRISPONDENZA TRA I TIPI DI ACCIAIO FRAZIONATI
THE CORRESPONDENCE BETWEEN THE STEEL TYPES IS ASSURED

ESISTE ÜBEREINSTIMMUNG ZWISCHEN DEN BEZUGSNUMMERN DER BEZUGSNUMMERN

TRATTAMENTO TERMICO - RICOTTURA DI SOLIDIFICAZIONE
HEAT TREATMENT - SOLUTIONS ANNEALING
WÄRMEBEHANDLUNG - LÖSUNGSLÖHUNG UND ABSCHÜLLEN
1110 (°C)/H2
Temperatura
supplire
Belastung
FIL151
22523
AUS COL
AUS COL
630.000 mm

RISULTATI DELLE PROVE / TEST RESULTS / ERGEBNIS DER PRÜFUNGEN

PROVA DI TRAZIONE/TENSILE TEST/ZUGVERSUCH ISO 6892-1

Nr. ROTOLO COIL NR. BAND NR.	PEZZI PIECES STÜCKE	PRODOTTO (mm) PRODUCT (mm) GEGENSTAND (mm)	(°)	SNERVAMENTO YIELD STR. DEHNGRENZE	SNERVAMENTO YIELD STR. DEHNGRENZE	ROTTURA ULT. STRENGTH ZUGFESTIGKEIT	ALLUNGAMENTO ELONG. % DEHNUNG	PESO WEIGHT GEWICHT	DUREZZA HARDNESS HARTE	P. PIEGA BEND FALTIV.
				Rp 0.2 % N/mm2	Rp 1 % N/mm2	Rm N/mm2	A 80 mm (N)			
				min MAX	min MAX	min MAX	min MAX			
J990S	1	0.250 x 185.510	T	273	305	609	62.0	618	129	OK
J990S		0.250 x 185.510	C	257	298	600	63		127	OK
J7L6X2S	2	0.250 x 185.510	T	254	289	618	62.0	678	143	OK
J7L6X2S		0.250 x 185.510	C	248	280	607	63		140	OK

EN 10028-7/PT2 EN 10088 PT-2 NIM; J990S ASTM KORNGROSSE ASTM E112 = 8.0; NIM; J7L6X2S ASTM KORNGROSSE ASTM E112 = 8.0

(*) T: TEST START; C: CODA END

(N) A 50 mm (PER SPESORE < 20 mm) o prodotto intero

RISULTATI DELL'ISPEZIONE E CONTROLLO DIMENSIONALI FAVOREVOLI
INSPECTION AND DIMENSIONAL CONTROL RESULTS ARE SATISFACTORY
BESCHÜDIGUNG UND ABMESSUNG OHNE BEANSTANDUNG

ESISTE CORRISPONDENZA TRA I TIPI DI ACCIAIO FRAZIONATI
TEST RESULT: THE MATERIAL IS SATISFACTORY AND IN ACCORDANCE WITH SPECIFICATION REQUIRED
WIR BESTÄTIGEN DASS DIE LIEFERUNG DEN VEREINBARUNGEN DER BESTELLANNAHME ENTSPRICH

DAS EINSATZMATERIAL WURDE GEBEHT

TR = TRASVERSAL/TRANSVERSAL
LO = LONGITUDINALE/LONGITUDINAL

P.M.L. (Laser) P.M.L. (Laser) P.M.L. (Laser) (X-Ray fluorescence method)

Marcatura / Marking/Kennzeichnung

(X) Timbro del produttore Producer Trade Mark Zeichen des Lieferanten		(X) Timbro dell'ispez. Inspector stamp Stempel des Werkstoffprüfenden	(X) Materiale e finitura Material & finishing Werkstoff und Oberflächen	III D
(X) Nr. collaudo Heat No. Schmelz		(X) Dimensioni Dimensions Abmessungen	(X) N. COIL COIL No. COIL Nr.	

Emesso in accordo con TÜV Bayern (85.91)
In accordance TÜV Bayern (85.91)
Ausgegeben in Übereinstimmung mit den TÜV Bayern (85.91)
Sestri Levante, 13.10.2014

ESISTE CORRISPONDENZA TRA I TIPI DI ACCIAIO FRAZIONATI
NO SIGNATURE REQUIRED SINCE 24 APRIL 1994
GEGENÜBEREINSTIMMUNG ZWISCHEN DEN BEZUGSNUMMERN

Arvedi

Arinox
Sestri Levante (GE) ITALIA
L'ISPETTORE AUTORIZZATO
DER WERKSTÄTTEVERSTÄNDIGE
Maurizio Pessina

Arinox S.p.A.
Sede legale
26010 Robecco d'Oglio (CR) - Italia
S.S 45/bis

Cap.Soc. 7.900.000,00 EUR i.v.
Società interamente controllata
da Iltà Inox S.p.A.

Sede Amm. e Stabilimento
16039 Sestri Levante (GE) - Italia
Via Gramsci, 41/A
Tel. +39 0185 3661
Fax +39 0185 366 320

R.I. CR 03086810102
Mecc. Est. CR 011871
C.F. 03086810102
Part.IVA It. 00203820998
REA 158333

e-mail: sales@arinox.arvedi.it
www.arvedi.it

Arinox

26-06-2015



Quality Management System certified by
TÜV Italia
according to UNI EN ISO 9001:2008

Certificato di collaudo - Test Certificate - Abnahmeprüfzeugnis

(In accordance with EN 10204 Test certificate 3.1)
(Secondo EN 10204 Certificato di collaudo 3.1)
(gemäß EN10204 Bescheinigung der Werkstoffprüfungen 3.1)

CLIENTE CUSTOMER BESTELLER	Elastiflex Lysice s.r.o. Prumyslová 591 679 71 LYSICE	NR. COLLAUDO TEST NR. PRÜF NR.	2015/ 93511/ 20/1 PL.Nr. 121056221/020
PRODOTTO PRODUCT PRÜFGEGENSTAND	ROLOLI DI ACCIAIO INOSSIDABILE COILS BÄNDER AUS NICHTROSTENDEM STAHL	FINITURA FINISH AUSFÜHRUNG	PROCESSO DI FUSIONE MELTING PROCESS ERSCHMELZUNGSART
SPECIFICA SPECIFICATION ANFORDERUNGEN	TUV AD 2000-W2, AD2000-W10 EN 10028-7/FED	ALTRE SPECIFICHE OTHER SPECIFICATIONS WEITERE LIEFERVORSCHRIFTEN	TIPO D'ACCIAIO STEEL TYPE MARKENBEZEICHNUNG
ORDINE CLIENTE CUSTOMER ORDER BESTELLUNG	15/243	NR. CONF. ORDINE OUR CONF. ORDER UNSERE BESTÄTIGUNG	111045350 / 000010 NUMBER / AISI WERKSTOFF / AISI

ANALISI/ANALYSIS/ANALYSE

Nr. ROTOLO/COIL Nr.	Nr. COLATA/HEAT Nr.	%	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Ti	%Nb	%N	%CU	%
COIL NUMBER	HEAT Nr.	min						17.000	9.000						
BAND Nr.	SCHMELZ Nr.	max	0.080	2.000	1.000	0.045	0.015	19.000	12.000		0.700				
J6E9BS	419127		0.040	1.100	0.380	0.030	0.003	17.220	9.030		0.375		0.012		

IL MATERIALE E' RESISTENTE AL TEST DI CORROSIONE INTERCRISTALLINA IN ACCORDO ALLE NORME DIN EN 3551-2 E ASTM A352 p.E
THE MATERIAL IS RESISTANT TO INTERCRYSTALLINE CORROSION IN ACCORDANCE WITH DIN EN 3551-2 AND ASTM A352 p.E
DIE ÜBERGANGSANTISTE SCHMELZLIST BESTÄNDIG GEGEN INKRISTALLINE KORROSION GEMÄß DIN EN 3551-2 UND ASTM A352 p.E

ESITO DELL'ESAME DI CORRISPONDENZA TRA I TIPI DI ACCIAIO FAVOREVOLI
THE CORRESPONDENCE BETWEEN THE STEEL TYPES IS ASSURED
ERNE PRÜFUNG AUF WERKSTOFFVERWECHSLUNG WURDE DURCHGEFÜHRT UND BEFRIEDIGEND

RISULTATI DELLE PROVE/TEST RESULTS/ERGEBNIS DER PRÜFUNGEN

PROVA DI TRAZIONE / TENSILE TEST / ZUGVERSUCH EN ISO 6892-1 - PROVA DI DUREZZA / HARDNESS / HAERTE EN ISO 6507-1															
CARATTERISTICHE RICHIESTE			PESO	POS	DIR.	SNERVAMENTO		SNERVAMENTO		ROTTURA	ALLUNGAM.	DUREZZA	PIEGA	DIM.GRANO	
REQUIRED CHARACTERISTICS			WEIGHT	LOC.	DIR.	YIELD STR.		YIELD STR.		UTS	ELONG. %	HARDNESS	BEND	GRAIN SIZE	
ANFORDERUNGEN			GEWICHT	LAGE	PROB.	DEHNGRENZE		DEHNGRENZE		ZUGFESTIGKEIT	DEHNUNG	HARTE	FALTV.	KORNGROSS	
						Rp 0.2 % N/mm2		Rp 1 % N/mm2		Rm N/mm2	A 80 mm		HV	ASTM E112	
Nr. ROTOLO	PEZZI	PRODOTTI (mm)		(#)	(*)	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
COIL Nr.	PIECES	PRODUCT	Kg		TR			260				45			
BAND Nr.	STUECKZHAL	GEGENSTAND			LO										
J6E9BS	1	0.150 x 51.650	179	T	TR	248		278		641	63.0	169	OK		8.0
				C	TR	259		289		653	61	171	OK		

RISULTATI DELL'ISPEZIONE E CONTROLLO DIMENSIONALI FAVOREVOLI
INSPECTION AND DIMENSIONAL CONTROL RESULTS ARE SATISFACTORY
BESICHTIGUNG UND AUSMESSUNG OHNE BEANSTANDUNG

ESITO DEL COLLAUDO: LE RICHIESTE DELL'ORDINE SONO SODDISFATTE
TEST RESULT: THE MATERIAL IS SATISFACTORY AND IN ACCORDANCE WITH SPECIFICATION REQUIRED
WIR BESTÄTIGEN DASS DIE LIEFERUNG DEN VEREINBARUNGEN DEL BESTELLANNAHME ENTSPRICHT

P.M.I. SODDISFATTO / SATISFACTORY / ERFÜLLT (X-Ray fluorescence method)
(*) DIREZIONE DEL PROVAIO / DIRECTION OF THE TEST PIECES / PROBENRICHTUNG
TR = TRASVERSALE / TRANSVERSAL / QUER
LO = LONGITUDINALE / LONGITUDINAL / LÄNGS
(#) PUNTO DI PRELIEVO / LOCATION OF THE SAMPLE / LAGE DES PROBENABSCHNITTES
T = TESTA / FRONT / ANFANG
C = CODA / BACK / ENDE

Marcatura / Marking/Kennzeichnung

<input checked="" type="checkbox"/> Timbro del produttore Producer Trade Mark Zeichen des Lieferwerkes		<input checked="" type="checkbox"/> Timbro dell'isp. autor. Inspector stamp Stempel des Werksachverständigen		<input checked="" type="checkbox"/> Materiale e finitura Material & finishing Werkstoff u. ausführungsart	III D
<input checked="" type="checkbox"/> Nr. colata Heat No. Schmelz		<input checked="" type="checkbox"/> Dimensioni Dimensions Abmessungen		<input checked="" type="checkbox"/> N. COIL COIL No. COIL Nr.	

Emesso in accordo con TÜV Bayern (08/91)
In accordance TÜV Bayern (08/91)
Ausgestellt in Einklang mit dem TÜV Bayern (08/91)

EGENERO CONTROFIRMA DAL 24 APRILE 1998
NO SIGNATURE REQUIRED SINCE 24 APRIL 1998
GEGENZEICHNUNG VERZICHT VON 24 APRIL 1998

Arvedi

Arinox
Sestri Levante (GE) ITALIA
L'ISPETTORE AUTORIZZATO
DER WERKSACHVERSTÄNDIGE
Maurizio Fessina

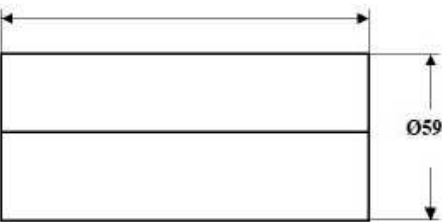

Sestri Levante, 19.06.2015

SKODOCK Gruppe <small>SKODOCK Deutschland - ELASTEFLEX Tschochien</small>	Specifikace postupu Svařování (WPS)
---	--

Výrobce:	ELASTEFLEX Lysice s.r.o., Průmyslová 591 CZ - 679 71 Lysice
----------	--

WPS č.:	ELA020	Svařec:	Pikna Petr
Metoda svařování:	15	Označení základního materiálu 1 Označení základního materiálu 2 *podle EN ISO/TR 15608	W.Nr. 1.4541 (*8.1)
Podložka:	ne	Tloušťka materiálu t (mm):	0,25
Druh spoje a druh svaru:	tupý	Vnější průměr (mm):	59
Způsob přípravy: Čistění:		Poloha svařování:	PA

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)

Tvar Spoje	Svařovací postup
	

Podrobnosti svařování

Vrstva	Metoda svařování (ISO4063)	Průměr trysky (mm)	Proud A	Napětí V	Druh proudu/polarita	Posuv [m/min]	Ochranný plyn [l/min]	Plasma plyn [l/min]
1	15	1,0	9,5±1	-	DC	1,5 (Odečteno ze stupnice)	7,5	1,5

Označení přídavného kovu:		Další údaje*, například:
Označení plynu dle EN ISO 14175: - Ochranný plyn: - plasma plyn: - pro ochranu kořene: - vnější ochranný plyn:	I1 (Argon 4.8) II (Argon 4.8)	- Rozkvy (max. šířka housenky): - Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva
Přítoková rychlost plynu [l/min]: - ochranného: - pro ochranu kořene:	7±1 7±1	- Podrobnosti pulzního svařování: - Vzdálenost napájecího přívlačku od prac. kusu:
Teplota předehřevu:	0°C	- Úhel sklonu hořáku:
Interpass teplota:	-	- Jiné údaje:
Dodatečný ohřev (dohřev):	ne	- Výrobce : (jméno, datum, podpis)
Ochlazování po svař.	vzduch	Jan Borek (IWE) 22.03.2016
Teplotní zpracování po svařování a/nebo stárnutí: doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlazení*:	ne	

* je-li požadováno